MANUAL
de Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios
en Honduras

Gobierno de la República de Honduras
Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas

agcichile
Agencia de Cooperación Internacional

Ministerio del Medio Ambiente
Gobierno de Chile

Ministerio de Salud
Gobierno de Chile

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas
100 mts, al sur del Estadio Nacional
http://www.serna.gog.hn/
Dirección General de GestiónAmbiental
Col. Tepeyac, contiguo al Restaurante El Corral
serna_dga@hotmail.com

Publicado por la

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Cooperación Triangular en Chile

María Ignacia Jiménez (maria.jimenez@giz.de)

Fabian Klein (fabian.klein@giz.de)

+56 2 27193900

www.giz.de

Presentación

El presente Manual de Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios en Honduras ha sido elaborado en el marco del proyecto triangular entre Honduras, Chile y Alemania. En su elaboración han participado la Secretaría de Estado en los Despachos de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas de Honduras (SERNA), los Ministerios de Medio Ambiente (MMA) y Salud (MINSAL) de Chile, la Agencia de Cooperación Internacional de Chile (AGCI) y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, empresa federal que asiste al Gobierno de la República Federal de Alemania en su labor en el ámbito de la cooperación internacional para un desarrollo sostenible.

En la elaboración del manual se ha procurado resumir y sistematizar los conocimientos desarrollados y la experiencia adquirida durante las últimas décadas por los países de la región en lo referente al diseño y operación de rellenos sanitarios.

El adecuado manejo de los residuos sólidos domésticos, - junto a la provisión de agua potable, el manejo de las aguas servidas y el control de vectores sanitarios -, forma parte esencial del saneamiento básico, condición necesaria sobre la cual sustentar toda iniciativa tendiente a proteger y mejorar la

salud y el bienestar de la población y la calidad de medio ambiente. No obstante lo anterior, el manejo ambientalmente racional de los residuos sólidos generados en los conglomerados urbanos de América Latina, y en particular lo referente a su disposición final, ha ido a la saga del desarrollo del resto de los componentes del saneamiento básico, y no ha sido sino a partir de la segunda mitad del siglo recién pasado que la disposición final de los residuos sólidos domésticos empezó a ser objeto de mayor atención por parte de las autoridades, la academia y la propia población.

Parte de la explicación del retraso anteriormente citado radica en el hecho que los efectos tanto sanitarios como ambientales de una mala disposición final de los residuos sólidos domésticos, si bien igualmente deletéreos, con frecuencia son menos evidentes y directos que las deficiencias detectables en el resto de los componentes del saneamiento básico, ya que no ha sido poco frecuente en los países de la región la práctica de enmascarar el problema entregando a la población un buen servicio de recolección y disponiendo los residuos recolectados en vertederos escasamente controlados en zonas periféricas alejadas de la vista de la población.

Por otra parte, dadas las diferencias en la composición de los residuos sólidos domésticos que se generaban en los países industrializados respecto de aquellos que se generaban en los conglomerados urbanos de América Latina, la oferta tecnológica disponible internacionalmente hasta hace algunas décadas atrás, -correspondiente a soluciones desarrolladas en los países industrializados-, no estuvo acorde con las características de los residuos sólidos domésticos generados en los países con economías en desarrollo o en transición haciéndola inviable desde el punto de vista técnico y económico y obligando a desarrollar localmente tecnologías adaptadas a las características propias de los residuos sólidos domésticos de los conglomerados urbanos de la región.

La técnica del relleno sanitario, en su actual expresión y desarrollo alcanzado en los países de la región, ha sido una apropiada respuesta a la falencia de la oferta tecnológica internacional anteriormente mencionada. El diseño y la operación de un relleno sanitario convenientemente adaptados a las características propias de los residuos sólidos domésticos generados en los conglomerados urbanos de los países de la región permiten controlar adecuadamente los riesgos sanitarios y ambientales asociados a su disposición final. Por otra parte, el equipamiento e infraestructura necesarios para su ejecución son de fácil obtención localmente; los requerimientos de cuadros profesionales y técnicos pueden ser perfectamente satisfechos a nivel de los países y su aplicabilidad, con las correspondientes adecuaciones, abarca toda la amplia gama de tamaños de localidades urbanas. En suma, y sin perjuicio de otras opciones técnicas hoy en día disponibles en los países de la región, el relleno sanitario, conforme a su actual desarrollo a nivel regional, es una solución eficaz y viable técnica y económicamente para dar

adecuada disposición final a los residuos sólidos domésticos generados en los conglomerados urbanos de América Latina.

El relleno sanitario es una técnica de ingeniería que conjuga el tratamiento de los residuos sólidos domésticos mediante procesos microbiológicos complejos con su disposición final en terreno aplicando estrictos procedimientos de control de la contaminación. Tanto el proyecto como la operación de un relleno sanitario requieren de capacidades profesionales y técnicas específicas que permitan diseñar las obras requeridas, dimensionar los factores de riesgo ambiental y sanitario asociados y dar adecuada solución a su prevención y control. Al respecto, particular atención merecen al momento de localizar, proyectar, operar y cerrar un relleno sanitario, las soluciones técnicas que se adopten para evitar la creación de focos de vectores sanitarios y controlar la emisión de malos olores así como para minimizar la generación de lixiviados y asegurar el confinamiento, control y adecuado manejo de aquellos cuya generación resulta inevitable, de forma de prevenir su infiltración en el subsuelo o su escurrimiento hacia cursos o masas de agua superficiales. Similarmente, la evacuación segura del biogás desde el interior del relleno y su manejo adecuado de forma de prevenir y controlar los riesgos de incendios, explosiones, migraciones a través del suelo y emisión de contaminantes al aire, son materias que requieren de soluciones técnicas específicas a considerar al momento de localizar, proyectar, operar y cerrar un relleno sanitario.

La aplicación de los criterios técnicos de diseño y operación de un relleno sanitario debe hacerse necesariamente dentro del marco y dando estricto cumplimiento a la normativa aplicable. Sin embargo lo anterior no garantiza el buen éxito del relleno: existe un aspecto de aceptabilidad por parte de la comunidad que es necesario tener en consideración al momento de decidir la instalación de un relleno sanitario, por lo que en la actualidad la consulta pública previa e informada se ha convertido en una práctica común y en algunos casos mandatoria para estos efectos.

El presente manual se hace cargo de las cuestiones anteriormente planteadas, entregando en forma resumida y con un enfoque pragmático criterios, metodologías y procedimientos para abordar técnicamente la localización, el diseño, la operación y el cierre de un relleno sanitario. Para estos efectos el manual se ha estructurado en base a los siguientes capítulos y contenidos:

Capítulo 1.- Introducción.

Se entrega primeramente una definición de relleno sanitario según la definición reglamentaria vigente en Honduras, diferenciando los distintos tipos de rellenos en ella identificados. Posteriormente se describen algunas modalidades de operación según las características del sitio en que se haya emplazado el relleno y según la forma en que se obtenga el material

de recubrimiento. Se analizan a continuación las eventuales ventajas y desventajas de utilizar la técnica del relleno sanitario como método de disposición final de residuos sólidos urbanos. Seguidamente se entrega información sobre generación y composición de los residuos sólidos domésticos. Por último se desarrolla un ejemplo de cálculo de generación de residuos.

Capítulo 2.- Requerimientos del sitio.

En este capítulo se analizan los diferentes aspectos a tener en cuenta al momento de elegir un sitio para emplazar un relleno sanitario. En primer término se describen los aspectos a considerar en relación con la zonificación urbana, los usos del suelo y las distancias críticas a puntos sensibles. Posteriormente se analiza la incidencia que tiene en la selección de un sitio la distancia a los centros de generación de los residuos y la importancia de disponer de accesos expeditos y transitables en forma permanente. Se describen luego métodos para estimar la capacidad de un sitio determinado y la importancia de evaluar la calidad y disponibilidad del material de cobertura. Finalmente se describen las consideraciones a tener en cuenta en relación con las características hidrogeológicas del suelo al momento de elegir un sitio y los criterios aplicables para minimizar los riesgos frente a la ocurrencia de escorrentías superficiales.

Capítulo 3.- Consideraciones de diseño.

En este capítulo se abordan en detalle los aspectos a tener en consideración al momento de diseñar un relleno sanitario. En primer término se entrega un método determinar la celda tipo para luego, en base a ella, establecer las necesidades diarias de material de cobertura. Seguidamente se expone un procedimiento para calcular la vida útil del sitio elegido y a continuación se entregan criterios para determinar las necesidades de impermeabilización de fondo y lateral y los aspectos de diseño a considerar en el proyecto para el adecuado control y manejo de lixiviados y biogás. Se describen luego las obras anexas necesarias y las obras de mitigación. Finalmente se refieren las opciones para la disposición de residuos de establecimientos de atención de salud y de otros residuos especiales.

Capítulo 4.- Habilitación y operación.

En este capítulo se abordan los aspectos operativos, comenzando por la construcción de la celda sanitaria, el control y manejo de lixiviados y el control y manejo de biogás. A continuación se abordan aspectos de la habilitación de un relleno, de la circulación interna, del control de ingreso de residuos y de la vigilancia del recinto. Seguidamente se aborda la selección de la maquinaria requerida para operar el relleno. Por último se entrega una descripción de los contenidos de un plan de operaciones y criterios generales para estimar los requerimientos de recursos humanos.

Capítulo 5.- Plan de cierre.

En este capítulo se abordan los aspectos a tener en consideración para diseñar el Plan de cierre de un relleno sanitario. Se abordan en particular el sello superficial, los usos posteriores del sitio y las necesidades de vigilancia y control posterior al cierre.

Capítulo 6.- Monitoreo.

Básicamente se describen las necesidades de monitoreo de aguas y de gases durante la operación de un relleno sanitario así como las necesidades de monitoreo de aguas y gases con posterioridad a su cierre.

Capítulo 7.- Cierre de botaderos a cielo abierto.

Se analizan los riesgos sanitarios y ambientales asociados a la existencia de botaderos a cielo abierto, se discute la necesidad de cerrar y sanear los botaderos a cielo abierto existentes al momento de poner en operación un relleno sanitario y se hace mención a las consideraciones sociales, económicas e institucionales a tener en cuenta al momento de decidir el cierre de un botadero a cielo abierto.

Anexos

En Anexos se entrega información adicional útil para uso y comprensión del manual. El Anexo 1 contiene información sobre las características de los residuos sólidos, en el Anexo 2 se define poder calorífico superior e inferior de los residuos y se entrega un método para su estimación, el Anexo 3 contiene un ejemplo de cálculo del Centro de Gravedad de Generación de los Residuos, el Anexo 4 aporta información sobre costos de un relleno sanitario y en el Anexo 5 se consignan los contenidos mínimos de un proyecto de relleno sanitario según la envergadura de la obra.

Índice

Capítulo 1 :: Introducción

1.1 Definición de Relleno Sanitario 11
1.2 Tipos de Rellenos Sanitarios 12
1.3 Ventajas y desventajas de un Relleno Sanitario 19
1.4 Características de los residuos sólidos domésticos 22
1.5 Generación de residuos sólidos domésticos 26
1.6 Gestión integral de los residuos sólidos 28

Capítulo 2 :: Requerimientos del sitio

2.1 Zonificación, usos del suelo, distancias críticas 31
2.2 Distancia a los centros de generación y accesos 32
2.3 Capacidad del sitio 33
2.4 Disponibilidad de material de cobertura 36
2.5 Características hidrogeológicas 38
2.6 Escurrimientos superficiales 39

Capítulo 5 :: Plan de cierre

5.1 Objetivo del Plan de cierre 113
5.2 Sello superficial 114
5.3 Usos posteriores del sitio 114
5.4 Vigilancia y control 115

Capítulo 6 :: Monitoreo

6.1 Monitoreo de aguas durante la operación 117
6.2 Monitoreo de gases durante la operación 118
6.3 Monitoreo de aguas posterior al cierre 119
6.4 Monitoreo de gases posterior al cierre 119

Anexos

Anexo 1 128
Anexo 2 133
Anexo 3 135
Anexo 4 139
Anexo 5 142

Capítulo 3 :: Consideraciones de diseño

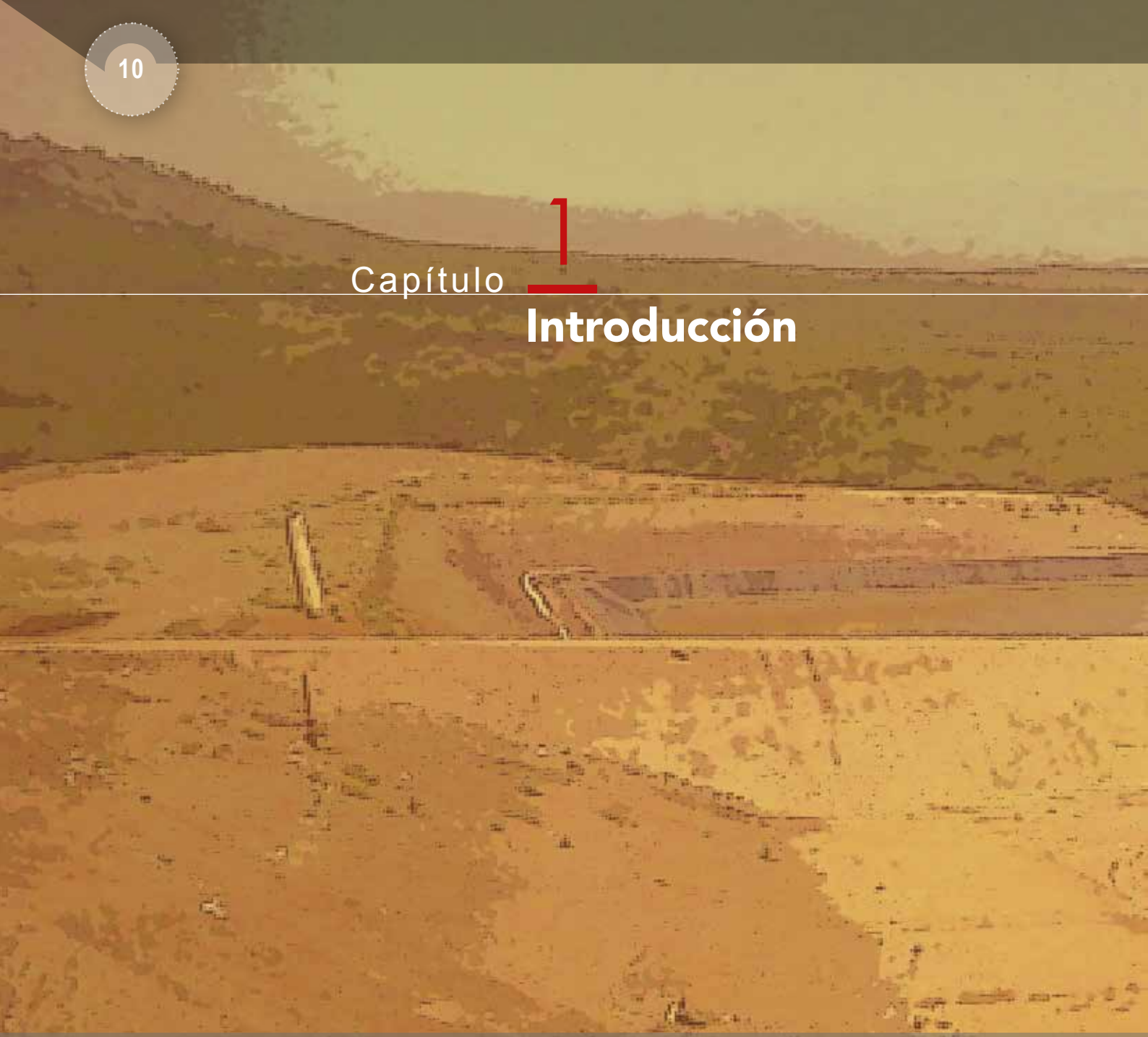
3.1 Diseño de la celda sanitaria tipo 41
3.2 Cálculo de la vida útil 45
3.3 Impermeabilización de fondo y lateral 49
3.4 Sistema de control de lixiviados 52
3.5 Sistema de control de biogás 69
3.6 Obras anexas 75
3.7 Instalaciones para la recepción de residuos espaciales al interior de un relleno sanitario 80

Capítulo 7 :: Cierre de botaderos a cielo abierto

7.1 Riesgos sanitarios y ambientales de los botaderos a cielo abierto 121
7.2 Necesidad de cierre y saneamiento de botaderos a cielo abierto 123
7.3 Planificación y ejecución del cierre de botaderos a cielo abierto 124

Capítulo 4 :: Habilitación y operación

4.1 Compactación de las celdas sanitarias 87
4.2 Cobertura de la celda sanitaria 88
4.3 Manejo de lixiviados 89
4.4 Manejo de biogás 91
4.5 Circulación al interior del relleno 92
4.6 Rejas de interceptación de materiales livianos 93
4.7 Control del ingreso de residuos 94
4.8 Vigilancia 94
4.9 Selección de maquinaria 94
4.10 Estimación de requerimientos de maquinaria para la construcción de las celdas en un relleno sanitario mecanizado 101
4.11 Equipo y herramientas utilizados en rellenos sanitarios manuales 108
4.12 Plan de operaciones 108
4.13 Recursos humanos 110



Capítulo 1

Introducción

1.1 Definición de Relleno Sanitario

El Relleno Sanitario es un "sitio para la disposición final de residuos sólidos, operado con técnicas de ingeniería, el cual dispone de sistemas de control de gases y lixiviados, para evitar daños a la salud y al medio ambiente." [1]

"Para la disposición final de los residuos sólidos no especiales, se adopta el método de relleno sanitario como la alternativa más conveniente." [2]

Básicamente, en un relleno sanitario los residuos son compactados en capas sucesivas al mínimo volumen practicable y son cubiertos diariamente con una capa de tierra, de acuerdo a técnicas de ingeniería comúnmente aceptadas.

En término generales, un relleno sanitario puede recibir residuos domésticos y asimilables a domésticos directamente desde los centros urbanos, así como residuos sólidos no especiales provenientes de plantas procesadoras de basuras,

Figura 1-1
Relleno Sanitario de área ubicado en el municipio de Comayagua, Honduras.

1 Reglamento para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos. Acuerdo Ejecutivo Número 1567-2010. Dado en Tegucigalpa, Municipio del Distrito Central, al un día del mes de octubre del año dos mil diez. (Artículo 6).

2 Id. anterior. Artículo 62

tales como plantas de compostaje; puede recibir también cantidades menores y controladas de lodos deshidratados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, cantidades limitadas de residuos industriales no peligrosos y materiales de decomiso de características similares y asimilables a alguno de los residuos clasificados dentro de los residuos sólidos domésticos. Los rellenos sanitarios no están diseñados, y por lo tanto no pueden recibir, residuos sólidos especiales o residuos que presenten alguna característica de peligrosidad.

La unidad básica mediante la cual se construye un relleno sanitario es la celda sanitaria, que corresponde a los residuos recibidos durante un día de operación del relleno, debidamente compactados y cubiertos por todos sus costados por una capa apropiada de tierra, de forma de confinarlos y aislarlos del medio ambiente externo. Con esto se consigue generar, al interior de la celda sanitaria, condiciones de ausencia de oxígeno atmosférico que favorecen el crecimiento y desarrollo de bacterias que utilizan la materia orgánica como nutriente, convirtiéndola en un material estabilizado no contaminante. Durante el proceso de estabilización se genera al interior de la celda sanitaria biogás, que al incrementar la presión interna tiende a migrar hacia zonas de menor presión, y líquidos percolados que transitan gravitacionalmente hacia la base de la celda.

1.2 Tipos de Rellenos Sanitarios [3]

Los rellenos sanitarios se pueden clasificar de acuerdo a su forma de operar, a la cantidad de residuos que pueden recibir o al tipo de residuos que aceptan. La reglamentación vigente diferencia cuatro tipos de rellenos sanitarios :

- Relleno sanitario mecanizado,
- Relleno sanitario semi-mecanizado,
- Relleno sanitario manual y
- Relleno sanitario de seguridad.

Los tres primeros tipos de rellenos sanitarios, que son a los que se refiere el presente manual, corresponden al método de disposición final que la reglamentación vigente adopta como la alternativa técnica y económica más conveniente para la disposición final de los residuos sólidos no especiales [4]. El cuarto tipo de relleno sanitario mencionado, el relleno sanitario de seguridad, está fuera del alcance del presente manual, y corresponde a la opción técnica recomendada

3 Reglamento para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos. Acuerdo Ejecutivo Número 1567-2010. Artículo 6.
4 Id anterior. Artículos 62 y 63.

para dar disposición final a residuos especiales y potencialmente peligrosos.

Tanto el relleno sanitario mecanizado, el relleno sanitario semi-mecanizado como el relleno sanitario manual pueden recibir, -en tanto no presenten alguna característica que los haga merecedores de un tratamiento especial-, los residuos sólidos domésticos, los que de acuerdo a su origen se clasifican en residuos sólidos de tipo domiciliario, comerciales, de mercados, institucionales, de la vía pública, de sitios de reunión pública y de parques y jardines. Estos tres tipos de rellenos se diferencian en la cantidad de residuos que son capaces de procesar diariamente, -y por lo tanto en la cantidad de población a atender-, en la complejidad de su diseño y en el grado de mecanización de su operación.

El **relleno sanitario mecanizado** es aquel diseñado para dar disposición final a los residuos sólidos de grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias de residuos sólidos no especiales. Este tipo de relleno requiere utilizar maquinaria pesada para sus operaciones.

El movimiento de los residuos, su acomodo, compactación y cobertura se realiza con equipos mecánicos tales como, bulldozers, cargadores frontales (pail loaders), motoniveladoras, etc. El sistema mecanizado permite dar oportuna compactación y cubrimiento diarios a cantidades importantes de residuos evitando la generación de inconvenientes de tipo sanitario y ambiental que pudieran afectar al entorno.

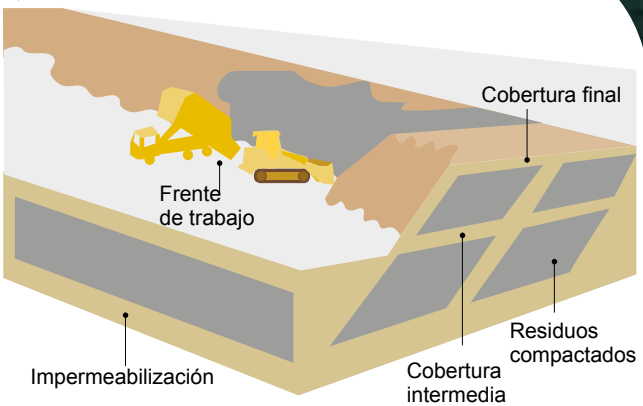


Figura 1-2
Relleno Sanitario Mecanizado

Figura 1-3
Relleno Sanitario Semi-mecanizado.
Tractor agrícola adaptado a labores de relleno sanitario

El **relleno sanitario semi-mecanizado** es aquel diseñado para dar disposición final a los residuos sólidos de poblaciones que generan entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos sólidos no especiales y que requiere utilizar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual a fin de hacer una buena compactación, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno.

En estos casos, un tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación puede ser un equipo apropiado para operar este tipo de relleno. En este tipo de rellenos se combina la operación diaria, manual o con maquinaria agrícola, con el apoyo periódico de maquinaria de movimiento de tierras que con una frecuencia quincenal o mensual puede concurrir al perfilado de superficies, el refuerzo del cubrimiento y la preparación y acondicionamiento de las áreas de próxima recepción de residuos.

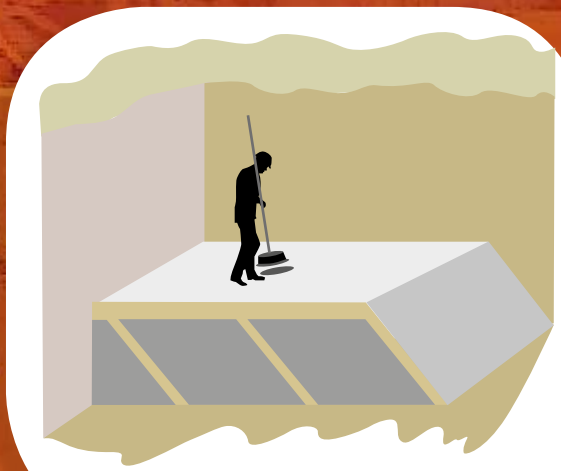


Figura 1-4
Relleno Sanitario Manual

El **relleno sanitario manual** es aquel diseñado para dar disposición final a los residuos sólidos de pequeñas poblaciones que producen menos de 15 toneladas diarias de residuos sólidos no especiales. En este tipo de rellenos las operaciones diarias de acomodo, compactación y cubrimiento de los residuos depositados son realizadas diariamente por operarios que utilizan herramientas de uso manual, tales como rastrillos, palas, carretillas, pisones, etc. Ocasionalmente, una o dos veces al año, se emplea maquinaria de movimiento de tierra para excavar trincheras o para acondicionar el suelo destinado recibir los residuos.

El **relleno sanitario de seguridad** es aquel diseñado para recibir y dar disposición final, previo tratamiento, a los residuos sólidos especiales y/o potencialmente peligrosos. Su diseño, construcción y operación debe realizarse de manera de asegurar a corto, mediano y largo plazo el aislamiento de los residuos depositados, limitando su potencial contaminante y los riesgos asociados a las sustancias contenidas en los mismos. Los rellenos sanitarios de seguridad no están diseñados para recibir residuos sólidos domésticos, y por lo tanto no pueden recibir este tipo de residuos.

1.2.1 Caracterización de un relleno sanitario según las particulares del terreno utilizado

- Relleno en áreas planas o llanuras.

Más que un rellenamiento es un depósito en terreno, en una superficie plana o de poca pendiente. Las celdas no tienen una pared o una ladera natural donde apoyarse, por lo que es necesario construir un muro terraplén de apoyo para evitar deslizamientos y dar al frente de trabajo y a las celdas pendientes laterales adecuadas. Este tipo de relleno solo es posible construirlo en zonas en donde no existe riesgo de inundación. Normalmente se hacen excavaciones previas al depósito de los residuos, utilizándose el material excavado para la dar cobertura a las celdas sanitarias.

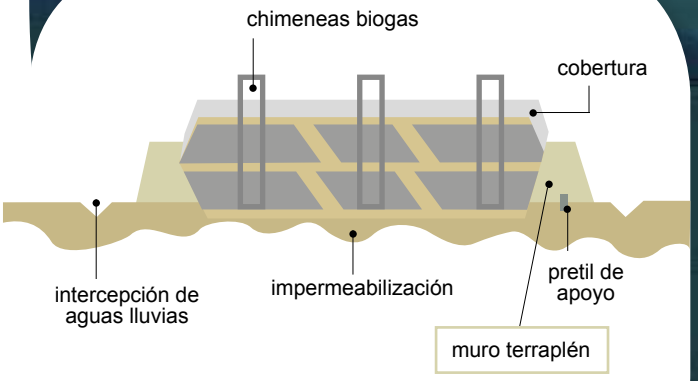


Figura 1-5
Relleno Sanitario en áreas planas o llanuras

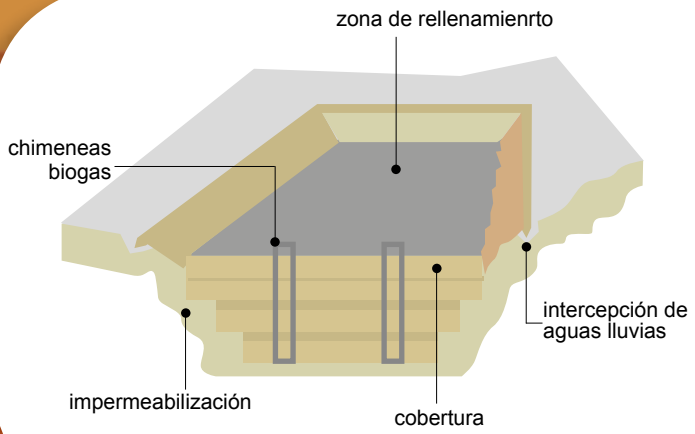


Figura 1-6
Relleno Sanitario en quebrada

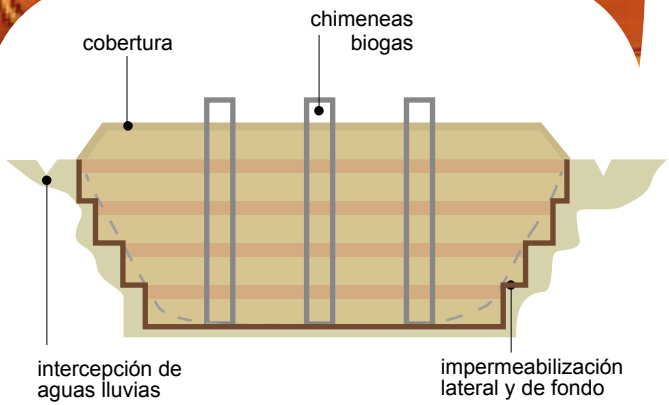


Figura 1-7
Relleno Sanitario en depresión

- Relleno en quebradas.

Aprovechando la existencia de quebradas naturales se acondiciona el terreno estableciendo niveles aterrazados, de manera de brindar una base adecuada para construir y sustentar las celdas sanitarias. Se deben realizar las obras necesarias para captar y desviar las aguas que normalmente escurren por la quebrada y entregarlas a su cauce normal aguas abajo del relleno.

- Relleno en depresiones.

Depresiones naturales o artificiales del terreno pueden utilizarse para construir un relleno sanitario siempre que se pueda controlar el ingreso de aguas a la depresión, ya sea que provengan de escurrimientos superficiales o de escurrimientos subterráneos que afloren por el fondo o las paredes, dado que la acumulación de agua obstaculiza la operación normal de todo relleno. La forma de construir el relleno dependerá del manejo que se dé al biogás y a los líquidos percolados.

- Relleno en laderas de cerros.

Las laderas de cerro constituyen una buena alternativa para apoyar un relleno sanitario. Normalmente se construyen partiendo desde la base del cerro y se va ganando en altura apoyándose en las laderas de forma similar al relleno de quebrada. Se debe aterrazar las laderas del cerro y construir zanjas de interceptación para captar perimetralmente y desviar las aguas de

escorrentía, de forma que éstas no ingresen al relleno. La tierra removida en el aterrazamiento se puede aprovechar como material de cobertura de las celdas sanitarias.

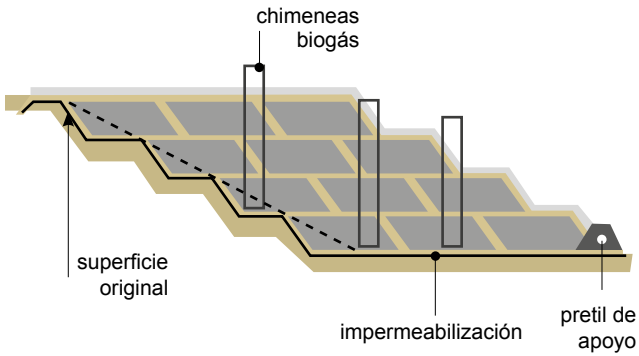


Figura 1-8
Relleno Sanitario en ladera de cerro

1.2.2 Caracterización de un relleno sanitario según la forma de obtención del material de recubrimiento

- Relleno en zanja o trinchera.

Se excava una trinchera, usualmente con maquinaria pesada, para construir en su interior las celdas sanitarias. Parte del material excavado se acopia a un costado de la zanja y se utiliza como material de cobertura. El tamaño de la zanja dependerá de la cantidad de residuos a disponer diariamente y del equipamiento que se posea. Es normal que el material excavado exceda varias veces en volumen la cantidad requerida para cubrir los desechos. Para facilitar la operación muchas veces deben moverse grandes cantidades de tierra al interior de la faena, encareciendo el trabajo. Es recomendable para rellenos que reciban no más de 80 ton/día pudiendo operar como relleno sanitario mecanizado, semi-mecanizado o manual, según su tamaño y diseño.

Figura 1-9
Rellenos Sanitarios de zanja o trinchera

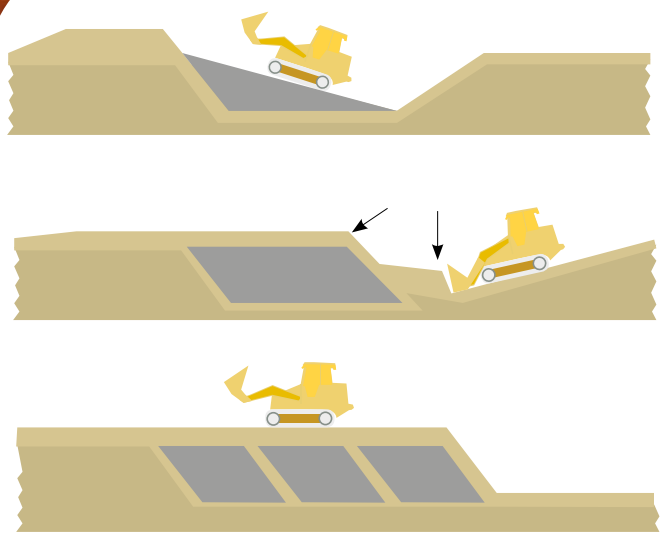


Figura 1-10
Relleno Sanitario de Excavación Progresiva

- Relleno de excavación progresiva.

La característica de este método es la simplicidad y la continuidad en la operación, ya que el material necesario para cubrir los residuos es excavado precediendo el área de trabajo y se va colocando directa e inmediatamente sobre los residuos previamente compactados. En altura sólo se puede construir una celda. Este tipo de relleno solo es apto para recibir pequeñas cantidades diarias de residuos a menos que se disponga de material de cobertura adicional de algún empréstito cercano, caso en el cual es posible hacer capas de celdas sobrepuestas.

- Relleno con material de recubrimiento de un banco de material de cobertura

Se utiliza cuando el sitio en el que se construye el relleno no dispone de material de cobertura. En este caso el material de recubrimiento (la tierra) necesario para cubrir la celda sanitaria es traído desde otro lugar. El material importado para cubrir los residuos, en general, es llevado al lugar de acuerdo con las necesidades de cada operación y depositado y acumulado en áreas cercanas al frente de trabajo. La distancia de transporte del material de cobertura debe ser objeto de especial atención, ya que será un factor importante en el costo de operación del relleno sanitario. Otro aspecto importante a considerar es la posible incidencia del tránsito de los vehículos que acarrean el material en el total del tránsito vehicular en torno al relleno sanitario.

1.3 Ventajas y desventajas de un Relleno Sanitario

1.3.1 Ventajas

Figura 1-11
Residuos de la demolición de una carretera

- El relleno sanitario, convenientemente localizado, bien diseñado y bien operado, permite eliminar los inconvenientes sanitarios, ambientales y sociales asociados a los botaderos a cielo abierto y a los botaderos controlados (insectos, roedores, malos olores, contaminación de suelos y aguas, incendios, humo, personas trabajando en condiciones insalubres, etc.)

- Es un método muy flexible capaz de absorber sin grandes problemas variaciones importantes en la cantidad y en el tipo de residuos que recibe, como es el caso de las variaciones estacionales y de la recepción esporádica de cantidades importantes de residuos provenientes de la recolección y limpieza de

Figura 1-12
Antiguo relleno sanitario "La Feria" en operación. Santiago de Chile, año 1980.

Figura 1-13
Relleno sanitario "La Feria" terminado y transformado en parque. Santiago de Chile, año 1998.

espacios utilizados para la celebración de festivales, celebraciones religiosas y otros eventos que congregan grandes cantidades de personas.

- Permite la recuperación de terrenos deteriorados o de difícil utilización posibilitando su transformación en parques, jardines, campos deportivos, terrenos agrícolas u otros.

- Bajo ciertas condiciones, en algunos rellenos sanitarios es factible extraer el biogás generado y utilizarlo como un recurso energético.

- Su puesta en marcha puede realizarse en forma rápida. Una vez elaborado el proyecto correspondiente, es posible habilitar el sitio elegido y poner en operación el relleno en uno o dos meses. En todo caso los tiempos necesarios para la habilitación dependerán, en última instancia, del tamaño y complejidad de cada proyecto específico de relleno sanitario.

- Los costos de inversión (terreno, maquinaria de movimiento de tierra, balanza, etc.) son bajos en comparación con otros métodos de tratamiento y disposición final (costo de obras de infraestructura, equipos de trituración, Incineradores, etc.).

- Los costos de operación y mantenimiento son reducidos. La maquinaria necesaria para su correcta operación es la maquinaria corrientemente utilizada en movimiento de tierras y los operadores pueden ser fácilmente capacitados para operar un relleno sanitario.

1.3.2 Desventajas

- Los procesos microbiológicos propios de un relleno sanitario dan lugar, al interior de las celdas sanitarias, a la generación de biogás y de líquidos percolados que cuando no son manejados convenientemente pueden generar molestias a la población y contaminación del medio ambiente, tales como emisión de olores y proliferación de vectores sanitarios.

- Si se descuida la vigilancia y el control de acceso a un relleno sanitario éste fácilmente puede convertirse en un botadero a cielo abierto ya que el ingreso de personas no autorizadas con el propósito de recuperar materiales directamente de entre los residuos llevados a un relleno para su disposición final resulta incompatible con su adecuada operación.

- Los rellenos sanitarios son frágiles frente a condiciones climáticas adversas tales como, lluvias intensas, fuertes vientos, etc. Ante a la ocurrencia de grandes precipitaciones usualmente los caminos internos se tornan difíciles de transitar y la operación del frente de trabajo se dificulta, lo que obliga a depositar los residuos en canchas de emergencia a la espera de la normalización de las condiciones meteorológicas.

Figura 1-14
Colapso de muro de contención por fuertes lluvias

Los rellenos sanitarios de gran tamaño pueden impactar fuertemente el flujo vehicular en los caminos cercanos y en las vías de acceso al relleno debido a la gran cantidad de vehículos que llegan a descargar residuos al lugar causando congestión y embotellamientos.

El tránsito de camiones tanto al interior como en el exterior del relleno puede dar origen a la suspensión de material particulado. Esto último es especialmente válido cuando las vías de acceso son de tierra. Adicionalmente, con frecuencia resulta difícil evitar que camiones que transportan residuos y transitan descubiertos derramen residuos en los caminos o que éstos sean arrastrados por el viento.

Los sitios aptos para establecer un relleno sanitario usualmente están alejados del centro de gravedad de generación de los residuos[5] lo que encarece el transporte.

La ubicación de los rellenos sanitarios en zonas cercanas a viviendas generalmente es resistida por la población local. Una causa frecuente de este rechazo radica en que los municipios usualmente llaman relleno sanitario a botaderos a cielo abierto y a vertederos controlados, instalaciones que por su misma naturaleza y concepción no permiten controlar los problemas sanitario-ambientales en la forma que sí lo hace un relleno sanitario.

1.4 Características de los residuos sólidos domésticos

Da acuerdo a la reglamentación vigente, los residuos sólidos domésticos son los generados por las actividades propias de las ciudades. Esto implica que son algo más que los residuos generados a nivel domiciliario, ya que incluyen los residuos generados por las diversas actividades inherentes a la ciudad, tales como:

a) Residuos domésticos.
b) Residuos de actividades comerciales.
c) Residuos de mercados.
d) Residuos de actividades institucionales y de servicios.
e) Fracciones de residuos hospitalarios asimilables a residuos domiciliarios.
f) Residuos provenientes de las labores de aseo de calles y vías públicas.
g) Residuos de sitios de reunión pública, áreas de esparcimiento, parques y jardines.
h) Retiro de la vía pública de animales muertos, muebles y trastos.
i) Fracciones de residuos industriales asimilables a residuos domésticos.

5 Ver definición de Centro de Gravedad de Generación de Residuos en Anexo 3.

La composición de los residuos producidos en una ciudad, depende de una serie de factores tales como desarrollo económico, nivel de ingreso de la población, actividades predominantes (industrial, comercial, etc.), patrones de consumo, grado de urbanización y densidad poblacional, entre otros, lo que explica que puedan existir variaciones importantes en la composición de los residuos sólidos domésticos de un país a otro, de una ciudad a otra e inclusive entre sectores de una misma ciudad, no obstante lo cual también es posible identificar algunos patrones comunes que caracterizan los residuos generados los países en desarrollo y, en función de ello, conocer las modalidades de manejo más adecuadas para darles tratamiento y disposición final.

Los residuos sólidos domésticos de los países de la Región de América Latina se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica biodegradable (fermentable) y un contenido relativamente bajo de materiales potencialmente reciclables (plástico, papel, cartón, metales, vidrio, etc.), si bien la tendencia actual es al incremento del contenido de reciclables y a la disminución de la proporción de materia orgánica fermentable.

Otras características importantes de los residuos sólidos son el contenido de humedad y el poder calorífico[6]. En término generales, la humedad presente en los residuos sólidos urbanos guarda una correlación inversa con el Producto Nacional Bruto per cápita de los países[7]. Dado que la humedad de los residuos sólidos urbanos proviene fundamentalmente de la materia orgánica fermentable presente en la masa de residuos, dependerá fuertemente de las modalidades de recolección y/o del retiro previo de fracciones reciclables el contenido final de humedad con que lleguen los residuos a los sitios de tratamiento o disposición final.

Por su parte, el poder calorífico de los residuos depende del contenido de materiales combustibles presentes, y la proporción aprovechable en generación de energía de este poder calorífico está condicionada por el contenido de humedad de los residuos. Históricamente, una de las razones para la falta de proyectos de transformación de los residuos en energía en América Latina ha sido el bajo poder calorífico de los residuos sólidos urbanos, cuya composición, con un alto porcentaje de residuos húmedos, no es propicia para la mejor productividad de la tecnología de conversión (solo en las grandes ciudades con altos niveles de desarrollo comercial e industrial es posible lograr los poderes caloríficos ideales, de 6 ó 7 MJ/Kg[8])[9]. La separación en origen permite la obtención de fracciones de residuos con un poder calorífico mayor

6 Ver definición de Poder Calorífico en Anexo 2.

7 Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. Waste. Investing in energy and resource efficiency. Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente. 2011.

8 Aprox. 1.400 a 1.600 kcal/kg (M J/kg = 239 x 10^3 kcal/kg).

9 Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en ALC 2010. OPS/OMS, AIDIS,BID.

al promedio, suficiente para sustentar procesos de incineración, sin embargo, el alto costo de los equipos de incineración sumado a la necesidad de asegurar un suministro mínimo de residuos de poder calorífico apropiado en forma permanente limitan fuertemente la práctica de la incineración de residuos sólidos urbanos.

Características de los residuos según Producto Nacional Bruto per cápita[10]

Composición de Residuos Sólidos Municipales % en peso

	Países de bajos ingresos < US $ 5.000	Países de ingresos medios US $ 5.000 - 15.000	Países de altos ingresos > US $ 15.000
Materia orgánica	50 – 80	20 - 65	20 – 40
Papel y cartón	4 – 15	15 - 40	15 – 50
Plásticos	5 – 12	7 - 15	10 – 15
Metales	1 – 5	1 - 5	5 – 8
Vidrio	1 – 5	1 - 5	5 – 8
Humedad (% en peso)	50% - 80%	40% - 60%	20% - 30%
Poder calorífico (kcal/kg base seca)	800 – 1.100	1.100 – 1.300	1.500 – 2.700

10 Fuente: Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. Waste. Investing in energy and resource efficiency. Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente, UNEP, 2011.

Composición Residuos Sólidos Domésticos. Tegucigalpa

Proyecciones 1996-2010[11]

Componente	año 1996 (%)	año 2004 (%)	año 2010 (%)
Residuos de alimentos	46	42	40
Papel y cartón	12	13	15
Textiles	3	3	3
Plásticos	7	8	8
Hierbas y madera	12	12	12
Cuero y caucho	2	2	2
Metales	2	3	4
Vidrios	3	4	4
Cerámica y tierra	13	12	10
Otros	0	0	0

11 Fuente: Análisis Sectorial de Residuos Sólidos. Honduras 2010. OPS.

1.5 Generación de residuos sólidos domésticos

La generación de residuos sólidos domésticos depende también del desarrollo económico, nivel de ingreso de la población, actividades predominantes (industrial, agrícola, comercial, etc.), patrones de consumo, grado de urbanización y densidad poblacional, si bien los dos factores más relevantes para estimar la generación per-cápita de residuos sólidos domésticos, expresada en términos de kilógramos generados en promedio diariamente por cada habitante (kg/hab/día), son el nivel de ingresos de la población y el tamaño del conglomerado urbano.

En términos generales, es posible decir que en los países de la Región de América Latina la generación per-cápita de residuos sólidos urbanos en las ciudades con más de 5.000.000 habitantes es del orden de 1kg/hab/día, cifra que disminuye progresivamente en la medida que las ciudades consideradas son más pequeñas. Las cifras de generación de residuos sólidos urbanos en países industrializados son significativamente mayores a las de países en desarrollo para todos los rangos de población.

Para estimar la generación futura de residuos de una localidad urbana en el largo plazo deben tenerse presente las dos principales causas de su incremento: el crecimiento de la población y el crecimiento económico.

El crecimiento de la población puede estimarse según los métodos de proyección poblacional corrientemente aceptados, siendo uno de los más utilizados la proyección geométrica con tasas de crecimiento anual obtenidas de cifras censales.

Para considerar el crecimiento económico y variables asociadas, pueden utilizarse modelos matemáticos de generación de residuos que consideran el ingreso per-cápita, el tamaño y posibilidades de incremento del comercio y la industria y el desarrollo urbanístico.

A continuación se entrega una tabla de generación per-cápita estimada para localidades urbanas de Honduras tomando como base la información proporcionada por el Análisis Sectorial de Residuos Sólidos, 2010, publicado por OPS, y suponiendo un incremento de la generación per-cápita de residuos de un 1% anual. Esta tabla puede ser utilizada como referencia para una primera estimación de la cantidad de residuos que se esperaría manejar y disponer en un relleno sanitario en una localidad urbana, conocida su población y la cobertura del servicio de recolección.

Estimación de la Generación de Residuos Sólidos Domésticos.

Honduras 2013[12] [13]

Rango de población (habitantes)	Generación per-cápita RSD (kg/hab/día)
Rango de población (habitantes)	Generación per-cápita RSD (kg/hab/día)
Mayor de 100.000	0,75
50.001 a 100.000	0,57
15.001 a 50.000	0,50[14]
Hasta 15.000	0,35[14]

En Anexo 1 se entregan diversos antecedentes obtenidos de la literatura técnica internacional referentes a generación y composición de los residuos sólidos urbanos.

12 Fuente: Análisis Sectorial de Residuos Sólidos. Honduras 2010. Publicado por OPS.

13 Las cifras de generación per-cápita para el año 2013 fueron estimadas a partir de la información sobre generación per-cápita contenida en el Análisis Sectorial de Residuos Sólidos. Honduras 2010. Publicado por OPS.

14 La estimación de la generación per-cápita de RSD se realizó en función de la generación de RS domiciliarios y la relación RS Doméstico/RS Domiciliarios conocida para el rango de población 50.001 a 100.000 hab.

1.6 Gestión integral de los residuos sólidos

La gestión integral de los residuos sólidos comprende las operaciones de prevención, reducción, almacenamiento y acondicionamiento, transporte, tratamiento y disposición final, fomentando su aprovechamiento con el fin de evitar riesgos a la salud y al ambiente[15].

De acuerdo al Reglamento para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos, la gestión integral de los residuos sólidos se rige por los principios de sostenibilidad ambiental, responsabilidad compartida, minimización o reducción en la fuente, responsabilidad extendida a los importadores y productores y gradualidad y mejora continua[16].

En el caso del manejo integral de los residuos sólidos no especiales corresponde tanto a la empresa privada como a las municipalidades impulsar y establecer programas y estrategias de reducción de residuos, basándose en los principios fundamentales de reducción en la fuente, reciclado, aprovechamiento y recuperación, de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Secretaría de Estado en los Despachos de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas de Honduras y por la Secretaría de Estado en el Despacho de Salud. La empresa privada y las municipalidades deben impulsar y establecer programas, bolsas de intercambio y centros de reciclaje y aprovechamiento de residuos, en función de la composición y características de los mismos.

Los residuos especiales no reciclables deben disponerse, después de su tratamiento y previo análisis de peligrosidad, en rellenos sanitarios y/o confinamientos de seguridad. Los residuos no especiales pueden someterse a tratamientos térmicos, como la incineración para la recuperación de energía, o biológicos, para el compostaje, o disponerse en rellenos sanitarios.

- Cálculo de la generación de residuos

Con el fin de hacer una primera aproximación respecto de la maquinaria necesaria para operar un relleno sanitario que atenderá a tres localidades urbanas cercanas entre sí, -la localidad XX, la localidad YY y la localidad ZZ-, se requiere estimar la cantidad total de residuos sólidos urbanos que será necesario manejar diariamente.

15 Reglamento para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos. Acuerdo Ejecutivo Número 1567-2010. Artículo 1.
16 Reglamento para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos. Acuerdo Ejecutivo Número 1567-2010. Artículo 5.

Localidad XX: 130.000 habitantes

Localidad YY: 36.000 habitantes

Localidad ZZ: 12.000 Habitantes

Generación estimada de RSU Localidad XX:	130.000 hab	X	0,75 kg/hab/día	=	97,5 ton/día
Generación estimada de RSU Localidad YY:	36.000 hab	X	0,50 kg/hab/día	=	18,0 ton/día
Generación estimada de RSU Localidad ZZ:	12.000 hab	X	0,35 kg/hab/día	=	4,2 ton/día
			Total	=	**119,7 ton/día**

Capítulo 2

Requerimientos del sitio

2.1 Zonificación, usos del suelo, distancias críticas

La correcta elección de un sitio para establecer un relleno sanitario es clave para el éxito del proyecto y evitará un sinnúmero de problemas posteriores. La selección de un sitio para establecer un relleno es un proceso que tiene componentes técnicos, administrativos y políticos.

Usualmente el proceso de elección del sitio comienza por la identificación de varios posibles sitios alternativos en donde la localización de un eventual relleno sanitario sea coherente con la planificación regional y local y en particular, con los planes de desarrollo urbano, por lo que la primera consulta debe hacerse al municipio respectivo.

Si bien un relleno sanitario se podría ubicar dentro del área urbana, se prefiere localizarlo en zonas periurbanas o rurales con el fin de evitar rechazos por parte de la población y debido a que, por lo general, en las áreas rurales la disponibilidad de terrenos aptos y de capacidad suficiente es mayor y el costo de los terrenos es menor.

La operación de un relleno sanitario implica, además del propio manejo de los residuos, tránsito de vehículos, movimiento de tierras con maquinaria pesada, operaciones de control del biogás y de los líquidos percolados, entre otras actividades capaces de generar molestias a la población (ruidos molestos, malos olores, emisión de material particulado, atracción de aves, etc.) por lo que un relleno sanitario debe ubicarse fuera del radio urbano y a una distancia no menor de 1 km de dicho perímetro.

Sin perjuicio de lo anterior, al momento de elegir un sitio para establecer un relleno sanitario se debe tener en consideración, además, la posible existencia de puntos sensibles que puedan

restringir la localización, tales como casas habitación aisladas, instalaciones agroindustriales o aeropuertos, situaciones que solo en algunos casos será posible abordarlas mediante la instalación de barreras o protecciones especiales.

La elección de un sitio para emplazar un relleno sanitario debe hacerse mediante un proceso participativo en donde la comunidad directamente afectada con su emplazamiento pueda informarse y opinar sobre el proyecto y conocer las medidas y obras previstas para evitar y/o controlar posibles daños sanitarios y ambientales. La consulta pública previa e informada se ha convertido en una herramienta útil tanto para conocer el grado de aceptación de un posible emplazamiento como para definir eventuales modificaciones que mejoren la percepción del proyecto por parte de la comunidad.

Una vez elegido un sitio que dé cumplimiento a los requerimientos técnicos materia del presente capítulo y asegurada su aceptación por parte de la comunidad será conveniente adoptar medidas que impidan la construcción de viviendas o de otras instalaciones sensibles en áreas que le signifiquen al relleno quedar en situación de incumplimiento de las distancias mínimas reglamentarias, de forma asegurar la operación del sitio al menos durante toda su vida útil prevista.

2.2 Distancia a los centros de generación y accesos

Un factor crítico en la elección de un sito para localizar un relleno sanitario es la distancia de éste al centro de gravedad de generación de los residuos[17], entendiendo por centro de gravedad el punto teórico desde donde podrían trasladarse al relleno todos los residuos generados en una ciudad a igual costo que si fueran trasladados desde los diversos puntos donde son efectivamente generados.

La distancia entre el relleno sanitario y el centro de gravedad de generación de los residuos es un factor crítico debido a que el costo de transporte es uno de los costos relevantes dentro del total de costos de un sistema de aseo urbano, en particular si ese transporte se realiza en los mismos camiones recolectores, pues distancias muy grandes, además de significar un gasto importante en combustible y horas-conductor, implican tiempos prolongados de viaje hacia y desde el relleno, lo que puede impedir aprovechar el camión recolector para hacer un segundo o tercer circuito diario de recolección.

La existencia de vías de acceso expeditas hasta el relleno sanitario es otro factor importante a considerar al elegir su localización. El disponer de más de una

17 Ver Anexo 3

vía de acceso puede evitar congestiones de tránsito y permite hacer frente a situaciones de emergencia tales como corte de caminos por lluvias intensas o accidentes en la vía. Un buen terreno para operar un relleno sanitario puede finalmente no ser elegible si éste posee una única vía de acceso que obliga a atravesar áreas predominantemente residenciales, zonas de alta congestión vehicular o si necesariamente se debe transitar por caminos con pendientes pronunciadas o que exijan maniobras difíciles al conductor.

2.3 Capacidad del sitio

La capacidad del sitio para recibir y disponer residuos es un criterio de especial relevancia al momento de seleccionar alternativas de localización. Si bien un relleno sanitario no requiere grandes obras de infraestructura, su capacidad debe asegurar una vida útil que justifique la inversión en oficinas, cerco perimetral, obras de drenaje y, tratándose de ciudades medianas y grandes, balanza de pesaje. Salvo casos justificados en contrario, los rellenos sanitarios para ciudades medianas se proyectan con una vida útil de al menos 10 años y para grandes ciudades de 20 a 30 años.

Para los efectos de prospectar posibles sitios alternativos donde localizar un relleno sanitario se puede estimar en forma muy preliminar la capacidad de rellenamiento necesaria de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V = \frac{365 \times 1{,}25 \times \text{Vida útil} \times \text{Pob} \times \text{ppc} \times \text{Cob}}{600}$$

Donde:

V = Volumen requerido (m^3)

365 = Número de días del año (días)

1,25 = Factor que considera el volumen ocupado por el material de cobertura (estimativamente un 25% del volumen de residuos para rellenos de área y 20% para rellenos de trinchera)

Vida útil = vida útil requerida (años)

Pob = población de la localidad (hab)

ppc = producción per-cápita (kg/hab/día)

Cob = cobertura del servicio de recolección (%x0,01)

600 = densidad de los residuos compactados en el relleno (600 kg/m^3 relleno mecanizado, 500 kg/m^3 compactación manual)

Ejemplo de Aplicación 1.

La ciudad XX ha decidido invertir en establecer un relleno sanitario que tenga una vida útil de al menos 12 años, para lo cual se seleccionarán 4 posibles sitios con el fin de, una vez evaluados, elegir el más apto. Para los efectos de prospectar y seleccionar los 4 sitios se ha estimado una capacidad de aproximadamente 698 mil m^3, de acuerdo al siguiente cálculo:

Población de la ciudad XX: 120.000 hab

Cobertura del servicio de recolección: 85%

ppc: 0,75 kg/hab/día (del Cuadro de Estimación de la Generación de Residuos Sólidos Domésticos. Honduras 2013. en Capítulo 1)

$$V = \frac{365 \text{ x } 1{,}25 \text{ x } 12 \text{ x } 120.000 \text{ x } 0{,}75 \text{ x } 0{,}85}{600} = 698.063 \text{ m}^3$$

Vale decir, suponiendo que el proyecto de relleno sanitario contempla una altura promedio de 20 m, se requerirá un área de rellenamiento de 3,5 Há.

Ejemplo de Aplicación 2.

La localidad YY ha decidido establecer un relleno sanitario semi-mecanizado con una vida útil prevista de 8 años. Los requerimientos de capacidad de los sitios a prospectar se pueden estimar preliminarmente de acuerdo al siguiente cálculo:

Población de la localidad YY: 42.000 hab

Cobertura del servicio de recolección: 95%

ppc: 0,50 kg/hab/día (del Cuadro de Estimación de la Generación de Residuos Sólidos Domésticos. Honduras 2013. en Capítulo 1)

$$V = \frac{365 \text{ x } 1{,}25 \text{ x } 8 \text{ x } 42.000 \text{ x } 0{,}50 \text{ x } 0{,}95}{500} = 145.635 \text{ m}^3$$

Suponiendo trincheras de 3 m de profundidad y 6 m de ancho, un espaciado entre trincheras de 5 m y una sobrecelda de 2 m en toda el área de rellenamiento, (sección de rellenamiento asociada al metro lineal de trinchera = (3 m + 2m) x 6 m + 5 m x 2 m = 40 m^2), se requerirá un área total de 4,0 Há.

Evidentemente, estos cálculos proporcionan una estimación preliminar de la capacidad de rellenamiento requerida muy útil para los efectos de prospectar alternativas y de seleccionar posibles sitios donde emplazar un relleno sanitario, pero una vez elegido el emplazamiento, corresponderá hacer, como parte del proyecto de ingeniería, un cálculo más fino de la vida útil de relleno en base al diseño de la celda tipo, el crecimiento estimado de la población, el incremento anual esperado de la producción per-cápita de residuos y la densidad final que se espera alcanzarán los residuos una vez estabilizados en el relleno. (ver capítulo 3).

2.4 Disponibilidad de material de cobertura

La cobertura de la celda tiene como fin primordial aislar los residuos confinados en su interior del ambiente exterior, de forma de generar, en el menor tiempo posible, condiciones anaeróbicas para su estabilización microbiológica. Esto impide la creación de hábitats favorables para la proliferación y/o atracción de vectores sanitarios a la vez que evita la infiltración de las aguas de precipitación que caen sobre el relleno y la salida incontrolada de líquidos, gases y vapores desde su interior.

La disponibilidad de material de cobertura en el sitio, o en los alrededores cercanos al sitio, en el que potencialmente se podría emplazar un relleno sanitario puede ser un factor determinante en la decisión final de su elección ya que la escasez de material de cobertura puede tener consecuencias sanitarias y ambientales graves y su obtención y transporte desde lugares alejados puede incrementar los costos de operación del relleno en forma significativa.

Las consideraciones anteriores muestran la importancia de asegurar la disponibilidad del material de cobertura necesario para operar un relleno. La escasez de material de cobertura puede dar lugar a coberturas deficientes capaces de desencadenar un sinnúmero de problemas sanitarios (proliferación de moscas, atracción de roedores, etc.) y ambientales (afloramiento y derrame de líquidos percolados, emanación de malos olores, etc.).

La eficacia de las coberturas intermedia y final estará determinada por las características del material del cual están compuestas y por las técnicas empleadas para su colocación. Las dos principales características de los suelos que determinan su aptitud para ser usados como material de cobertura son su permeabilidad y su capacidad de retención (absorción) de agua, las que en conjunto determinan su capacidad para constituir un sello aislante.

La importancia de la capacidad de retención (absorción) de agua de la capa de cobertura radica en la posibilidad de absorber, y al menos temporalmente, retener superficialmente el agua de infiltración, - que de otra manera percolaría hacia el interior del relleno-, facilitando de este modo su posterior evaporación, cuando las condiciones meteorológicas lo permitan, y/o su escurrimiento superficial hacia canaletas de evacuación.

El U.S.C.S. (Unified Soil Classification System) agrupa los componentes del suelo de acuerdo, en lo fundamental, al tamaño de las partículas que lo componen, diferenciando los porcentajes de arena, limo y arcilla. En términos generales, suelos compuestos bien graduados tienen una permeabilidad menor que aquellos de granulometría uniforme. La permeabilidad de los diferentes tipos de suelo puede ser cuantificada en función del coeficiente de conductividad hidráulica (permeabilidad), K, cuyo valor será función de su granulometría, textura y estructura.

El material de cobertura requerido para la ejecución

Ejemplo de Aplicación 3.

En el Ejemplo de Aplicación 1 se calculó que la capacidad total requerida para construir un relleno sanitario para la localidad XX era de aproximadamente 698 mil m^3, por lo que las necesidades de material de cobertura para operar durante la vida útil del relleno ascienden a 139.613 m^3, según el siguiente cálculo:

$$\mathbf{V}\ (\text{tierra}) = 698.063\ m^3 \times 0{,}20 = 139.613\ m^3$$

$$= \frac{365 \times 12 \times 120.000 \times 0{,}75 \times 0{,}85}{600} \times 0{,}25 = 139.613\ m^3$$

de las celdas debe ser bien graduado, homogéneo y tener un coeficiente de permeabilidad no superior a $1x10^{-4}$ cm/s una vez compactado. La permeabilidad del material de cobertura puede determinarse en un laboratorio de mecánica de suelos.

Para los efectos de evaluar la disponibilidad de material de cobertura en la etapa de selección de un sitio para localizar un relleno sanitario se puede estimar que se requerirá un volumen de tierra ascendente al 25% del volumen de residuos recién compactados en las celdas sanitarias que se construirán durante toda la vida útil del relleno o, lo que es equivalente, aproximadamente un 20% del volumen total de rellenamiento requerido según el procedimiento de cálculo utilizado en el Ejemplo de Aplicación 1 anterior.

Ejemplo de Aplicación 4.

Para el caso del Ejemplo de Aplicación 2, no es necesario hacer el cálculo de disponibilidad de material de cobertura, ya que por tratarse de un relleno sanitario de trinchera las celdas sanitarias se cubrirán con parte del material obtenido durante en la excavación de las trincheras.

2.5 Características hidrogeológicas

Uno de los aspectos de mayor importancia a tener en cuenta en la selección de un sitio donde localizar un relleno sanitario es la prevención y control de la contaminación de las aguas subterráneas.

Los líquidos percolados, bajo determinadas condiciones de permeabilidad y gradiente hidráulico, pueden transitar a través del suelo y llegar hasta las napas subterráneas, por lo que resulta muy importante conocer el tipo de suelo (estratigrafía) y las características hidrogeológicas del sitio donde se pretende instalar un relleno y, de ser el caso, estimar las obras de impermeabilización que sería necesario implementar para proteger la calidad de las aguas subterráneas.

Los suelos sedimentarios con características areno-arcillosas son los más recomendables ya que son suelos poco permeables, por lo cual la infiltración de los líquidos percolados se reduce sustancialmente.

Para la evaluación preliminar de los sitios alternativos seleccionados para localizar un relleno sanitario es posible recurrir, cuando ello exista, a la información geológica disponible a nivel provincial y/o municipal y al registro de la información generada durante la perforación de pozos cercanos. De lo contrario será necesario realizar una prospección que permita estimar las principales características del suelo y descartar la presencia de napas subterráneas demasiado superficiales, prospección que una vez elegido el sitio deberá complementarse con un estudio hidrogeológico para conocer la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea y la dirección y velocidad del su escurrimiento y para definir los eventuales requerimientos de obras de impermeabilización. Lo anterior requiere de la realización de pozos de prospección, los que posteriormente podrán ser incorporados al conjunto de pozos de monitoreo a que se hace referencia en el capítulo 6.

Sin perjuicio de las obras de impermeabilización que se estime necesario implementar de acuerdo a las características hidrogeológicas y a las particularidades del relleno, y en especial, de acuerdo a su tamaño, se recomienda que la distancia entre el fondo del relleno y el nivel freático más alto no sea inferior a 3 metros y que la capa de suelo que medie entre ambas superficies tenga un coeficiente de conductividad hidráulica (permeabilidad) equivalente no superior a 10^{-5} cm/s.

2.6 Escurrimientos superficiales

El ingreso de aguas de escurrimiento superficial es una de las principales contribuciones a la cantidad total de líquidos porcolados generados en un relleno sanitario. Es por esto que la elección del sitio debe poner énfasis en prevenir el ingreso al relleno de las aguas de escurrimiento superficial provenientes de sus alrededores. A este respecto, al momento de evaluar los sitios seleccionados en primera instancia para localizar un relleno sanitario deben identificarse todos los cursos o masas de agua superficiales existentes en los alrededores de cada sitio y recabarse información histórica sobre sobre los niveles máximos alcanzados o las máximas crecidas registradas.

Toda propiedad que se destine a relleno sanitario debe estar ubicada fuera de zonas de inundación, pantanos y marismas y a una distancia mayor de 150 metros de la crecida mayor de los ríos y de la mayor marea del mar. Cuando la corriente de agua sirva para el abastecimiento de agua potable de una población, el terreno debe ubicarse fuera del área de drenaje del cuerpo de agua.

Capítulo 3

Consideraciones de diseño

3.1 Diseño de la celda sanitaria tipo

Las celdas que contienen los desechos en los rellenos sanitarios son, en esencia, las unidades básicas constructivas de la obra. En rigor, la celda sanitaria corresponde a los residuos ingresados durante la jornada diaria de funcionamiento del relleno, debidamente acomodados, compactados y cubiertos con una capa apropiada de tierra. Determinar sus dimensiones características es fundamental para programar el desarrollo del relleno. El diseño de la celda tipo de un determinado relleno sanitario implica definir cuatro dimensiones: **la longitud del frente de trabajo, la altura de la celda, el espesor de la capa de recubrimiento y el avance diario.**

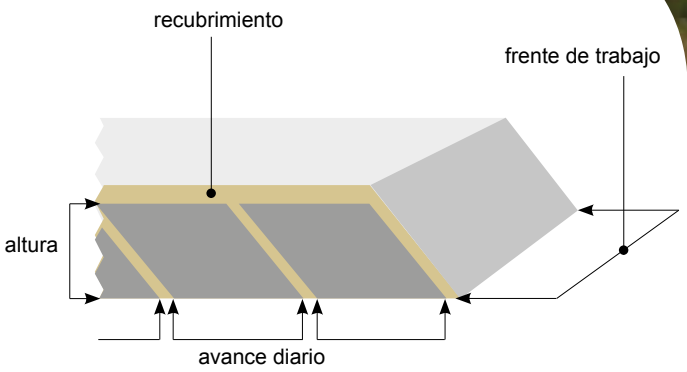


Figura 3-1
Esquema de diseño de la Celda Tipo

El frente de trabajo:

En el caso de rellenos sanitarios mecanizados, el frente de trabajo debe ser lo suficientemente amplio como para permitir la descarga simultanea de varios vehículos recolectores, de manera de evitar la acumulación de éstos en dicho frente en la hora de mayor afluencia. Por otra parte, la amplitud del frente de trabajo debe limitarse en beneficio del uso eficiente del equipo de compactación, ya que la experiencia

indica que el ancho máximo a cubrir por cada equipo compactador no debe exceder cuatro veces el ancho de la placa de empuje. Cabe señalar que el uso eficiente del equipo minimiza la permanencia de basura no cubierta en el frente de trabajo.

Para dimensionar el frente de trabajo de un relleno mecanizado es posible aplicar los siguientes criterios de cálculo:

- En la hora de mayor afluencia ingresan al relleno entre el 25% y el 30% del total de camiones recolectores que concurren diariamente a descargar a un relleno.
- El número total de camiones que se prevé ingresará diariamente al relleno se calcula en función de la capacidad de carga de los camiones recolectores y la cantidad diaria promedio de residuos a recoger.
- El tiempo necesario para la descarga de un camión recolector es, en promedio, 5 minutos.
- Cada camión recolector requiere un promedio de 5 metros para maniobrar, aculatarse y descargar en el frente de trabajo.
- Se debe considerar uno o dos espacios de descarga adicionales previendo el ingreso de camiones particulares y/o la ocurrencia de desperfectos en algún camión durante la descarga.

En el caso de rellenos sanitarios semi-mecanizados y manuales el frente de trabajo estará determinado por el ancho de la trinchera, cuando se opere un relleno de este tipo, o por el espacio necesario para la descarga de uno a dos vehículos recolectores.

La altura de la celda puede ser variable:

En términos generales, a menor altura, se obtiene una mayor estabilidad estructural del relleno pero la proporción de material de recubrimiento a utilizar será mayor; en tanto que a mayor altura, se utilizará menor cantidad de material de recubrimiento y se favorecerán los proyectos de extracción de biogás. Las alturas recomendadas en el caso de rellenos sanitarios mecanizados, varían entre 2 y 5 metros. Las alturas superiores a 4 metros se utilizan, en general, cuando la celda se apoya sobre paredes laterales o terraplenes resistentes para asegurar su estabilidad estructural.

En el caso de rellenos sanitarios semi-mecanizados y manuales las alturas recomendadas están dentro del rango de 1 a 1,5 metros con el fin de lograr una mayor compactación y evitar riesgos de accidentes a los operadores.

El espesor del recubrimiento:

Queda definido por el espesor mínimo que evita la emergencia de la larva de la mosca, que para el caso de un material compuesto de limo, arcilla y arena es de 10 cm. Para tener un cierto grado de seguridad y ponerse a cubierto frente a la ocurrencia de posibles irregularidades en el espesor de capa de cobertura la literatura técnica internacional recomienda para la capa de recubrimiento un espesor mínimo de 15 a 20 cm, tanto para rellenos sanitarios mecanizados, como para rellenos sanitarios semi-mecanizados y manuales.

La pendiente de los taludes laterales y del frente de trabajo recomendada es de 1:3, (1 m de altura por cada 3 m de base), lo que corresponde a un ángulo de aproximadamente 18,4º; pendiente que permite el buen desempeño de los equipos compactadores. La prescripción de taludes con inclinaciones superiores a 1:3 debe justificarse mediante un estudio de estabilidad del relleno que garantice que la obra resistirá las solicitudes de los esfuerzos actuantes y que no se producirán deslizamientos.

El avance diario se calcula en base a las dimensiones antes definidas y a la cantidad de residuos sólidos que ingresan diariamente al relleno.

A continuación, a modo de ejemplo, se dimensiona la celda sanitaria tipo de un relleno sanitario que planea atender una localidad de 800.000 habitantes, con una ppc de 0,75 kg/hab/día, por lo que estima recibirá 600 ton/día.

i) **Cálculo del frente de trabajo** (ancho de la celda). En la actualidad los vehículos recolectores de residuos sólidos domiciliarios cargan en promedio 8 toneladas por viaje, esto significa que el relleno recibirá, aproximadamente, 75 camionadas por día. Durante la hora de mayor afluencia llegarán a descargar entre un 25% y un 30 % del total diario, es decir, entre 19 y 23 camionadas de residuos por hora. Si se considera 23 camionadas por hora y se asume una distribución relativamente uniforme en el tiempo, llegará a descargar un camión cada 2,6 minutos. Dado que los camiones compactadores demoran en la descarga en el frente de trabajo un promedio cinco minutos, se necesitarán como mínimo 3 espacios para evitar congestionamiento; por otra parte, diariamente llegan vehículos particulares con residuos, casi todos de descarga manual, ocupando un lugar en el frente de trabajo, a veces por más de treinta minutos, y, además, es posible que se produzcan desperfectos en más de una ocasión cuando un camión esté descargando, lo que lleva a considerar dos espacios adicionales para atender estas situaciones.

   Dado que cada camión necesita 5 m para maniobrar y descargar en el frente de trabajo, se requiere como mínimo un frente de trabajo de **25 m de largo**.

ii) **Determinación de la altura.** Dado que no está prevista la explotación del biogás como fuente de energía y considerando que interesa asegurar la estabilidad de las celdas sanitarias, se construirán celdas de **3 m de altura**.

   El talud tanto del frente de trabajo como lateral será de 1:3, (1 m de altura por cada 3 m de base).

iii) **Espesor de la capa de recubrimiento.** El diseño de esta celda tipo prevé utilizar **0,2 m** tanto para la capa superior horizontal de la celda como para el cubrimiento del talud correspondiente al frente de trabajo y el cubrimiento del talud lateral.

iv) **Cálculo del avance diario**. Para este ejemplo se considera **0,6 ton/m^3** como valor de densidad inicial de los residuos una vez compactados.

   Considerando que la cantidad promedio diaria de residuos recibidos en el relleno es de 600 toneladas, el volumen de basura contenida inicialmente en cada celda será de 1.000 m^3, de

donde resulta un avance diario de **13,33 m** más el espesor de recubrimiento.

$$\textbf{Avance diario} = \frac{600\ \text{ton/dia}}{0{,}6\ \text{ton/m}^3} \times \frac{1}{3\ \text{m} \times 25\ \text{m}} = 13{,}33\ \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

v) Cálculo del material de recubrimiento

Material de recubrimiento necesario para cubrir la superficie superior de la celda:

$$\textbf{Mss} = 13{,}33\ \text{m} \times 25\ \text{m} \times 0{,}2\ \text{m} = 66{,}65\ \text{m}^3$$

Material de recubrimiento necesario para cubrir el talud del frente de trabajo:

$$\textbf{Mft} = 10{,}14\ \text{m} \times 25\ \text{m} \times 0{,}2\ \text{m} = 50{,}7\ \text{m}^3 \qquad \left(10{,}14\ \text{m} = \frac{(3\ \text{m}+0{,}2\ \text{m})}{(\text{sen}\ 18{,}4°)}\right)$$

Material de recubrimiento necesario para cubrir el talud lateral:

$$\textbf{Mtl} = 10{,}14\ \text{m} \times 13{,}53\ \text{m} \times 0{,}2\ \text{m} = 27{,}44\ \text{m}^3 \qquad (13{,}53\ \text{m} = 13{,}33\ \text{m} + 0{,}2\ \text{m})$$

$$\textbf{Total} = 144{,}8\ \text{m}^3$$

vi) Celda tipo. La celda tipo tiene una altura total de 3,2 m, un frente de 25,2 m y un avance diario de 13,53 m aproximadamente; contiene 1.000 m^3 de basura compactada, ocupa un volumen total en sus inicios de 1.144,8 m^3 (1.000 m^3 + 144,8 m^3) y en su confección se utilizan 144,8 m^3 de material de recubrimiento por día, aproximadamente.

3.2 Cálculo de la vida útil

Tal como se señaló en Capítulo 2, una estimación de la capacidad de rellenamiento requerida resulta muy útil para los efectos de seleccionar alternativas y de elegir el sitio donde emplazar un relleno sanitario, pero el proyecto de ingeniería de un relleno sanitario requiere hacer un cálculo más fino de su vida útil, en función de la variación en el tiempo de las cantidades de residuos recibir y de la celda tipo asociada.

Además de las dimensiones de la celda tipo, un aspecto importante a considerar al momento de calcular la vida útil del relleno, dice relación con el cambio de densidad que sufren los residuos en su interior durante los procesos de estabilización.

En el caso de los rellenos sanitarios mecanizados, al construir la celda sanitaria los residuos son compactados por la maquinaria hasta alcanzar, dependiendo del equipo utilizado para la compactación, una densidad inicial de 0,60 ton/m^3 a 0,85 ton/m^3. Esto es, 0.60 a 0.75 ton/m^3 si se compacta con bulldozer de oruga y 0.75 a 0,85 ton/m^3 si se compacta con equipos de alta compactación.

Luego de construidas las celdas sanitarias, los procesos de estabilización, la acción del sobrepeso de celdas superiores y el tránsito vehicular hacen que el conjunto de materiales dispuestos se vaya asentando progresivamente e incrementado su densidad dentro del relleno, llegándose a densidades finales de 0,8 a 1,0 ton/m^3.

En el caso de los rellenos sanitarios semi-mecanizados y manuales la densidad de los residuos recién compactados es relativamente baja, del orden de 0,40 a 0,50 ton/m^3. La densidad final, una vez estabilizados los residuos, alcanza valores entre 0,5 y 0,6 ton/m^3.

En el cuadro siguiente se entrega un procedimiento para calcular la vida útil proyectada de un relleno sanitario tomando en consideración las definiciones y procesos mencionados anteriormente.

Relleno Sanitario, Cálculo de la vida útil

Año	Pob (hab)	Res (ton)	Vol(b) (m^3)	Vol(t) (m^3)	Vol(bf) (m^3)	Vol(tf) (m^3)	Vol(to) (m^3)	Vol(r) (m^3)
1	Pob_1	Res_1	$Vol(b)_1$	$Vol(t)_1$	$Vol(bf)_1$	$Vol(tf)_1$	$Vol(to)_1$	$Vol(r)_1$
2								
--								
--								
n	Pobn	Resn	Vol(b)n	Vol(t)n	Vol(bf)n	Vol(tf)n	Vol(to)n	Vol(r)n

Donde:

Pob_1 = población (con servicio de recolección) al año 1
Pob_n = población (con servicio de recolección) al año n

Si solo se prevé un crecimiento vegetativo de la población, la población al año q se puede estimar mediante la fórmula siguiente:

$$Pq = P_1 (1 + t)^{q-1}$$

P_1 = población al año 1
t = tasa de crecimiento anual de la población. Se obtiene de los datos censales

ppc_1 = producción per-cápita al año 1
ppc_n = producción per-cápita al año n

la producción per-cápita al año q se puede estimar mediante la fórmula siguiente:

$$ppc\ q = ppc1\ (1 + t)^{q-1}$$

ppc_1 = producción per-cápita al año 1
t = tasa de crecimiento anual de la producción per-cápita, usualmente t=0,01 (1% anual)

Res_1 = peso de los residuos ingresados en el año 1 (en toneladas)
= 365 x ppc_1 x pob_1 / 1.000

$Vol(b)_1$ = volumen de los residuos ingresados en el año 1, recién compactados
= Res_1 / d_i (d_i = densidad residuos recién compactados: 0,6 ton/m^3 a 0,85 ton/m^3)

$Vol(t)_1$ = volumen de tierra utilizada para el cubrimiento de las celdas en año 1
= $Vol(b)_1$ x % / 100
(% = porcentaje de material de cobertura; se obtiene del diseño de la celda tipo)

$Vol(bf)_1$ = volumen final de los residuos año1 estabilizados y asentados
= Res1 / d_f (d_f = densidad final residuos en relleno: entre 0,8 y 1,0 ton/m^3)

$Vol(tf)_1$ = volumen final total ocupado por las celdas del año 1
= $Vol(bf)_1 + Vol(t)_1$

$Vol(to)_1$ = volumen total ocupado desde el inicio hasta el término del año 1
= $0 + Vol(tf)_1$

$Vol(to)_2$ = volumen total ocupado desde el inicio hasta el término del año 2
= $Vol(to)_1 + Vol(tf)_2$

$Vol(r)_1$ = volumen restante al término del año 1
= Capacidad de sitio – $Vol(to)_1$

$\mathbf{Vol(r)_2}$ = volumen restante al término del año 2

= Capacidad de sitio – $Vol(to)_2$

El cálculo se termina cuando se agota la capacidad del sitio, esto es, cuando el volumen restante se hace cero.

3.3 Impermeabilización de fondo y lateral

El proyecto de un relleno sanitario debe considerar el control de la contaminación de aguas y suelos por acción de los lixiviados generados al interior del relleno, dado su potencial contaminante. Por otra parte, la generación de biogás puede dar origen a migraciones laterales de gases combustibles a través de las paredes del relleno, los que pueden alcanzar zonas pobladas o cultivos aledaños o dar origen a la acumulación de mezclas explosivas en zonas bajas o en recintos cerrados. Todo lo anterior hace necesario, al menos en el caso de rellenos mecanizados, prever obras de impermeabilización del fondo y de las paredes del relleno.

El objetivo de la impermeabilización es reducir la infiltración de los lixiviados generados en la masa del relleno a tasas compatibles con la preservación de la calidad de las aguas subterráneas de forma de asegurar sus usos actuales o futuros, y evitar la migración incontrolada de biogás a través del terreno hacia puntos y zonas sensibles.

De acuerdo a lo anterior, todo proyecto de relleno sanitario mecanizado debe incorporar una estimación de la generación de líquidos lixiviados y biogás y el diseño de un sistema de impermeabilización lateral y de fondo si el terreno sobre el cual se asienta el relleno no es lo suficiente impermeable, de acuerdo a estudios de conductividad hidráulica, como para asegurar la protección de las aguas subterráneas y evitar la migración lateral de biogás. La reglamentación vigente, la calidad del terreno en que se construye el relleno sanitario, la profundidad de las aguas subterráneas, la existencia de áreas pobladas y de cultivos en los alrededores y el tamaño del relleno permitirán decidir respecto de la necesidad impermeabilizar y, de ser ese el caso, respecto del tipo y características de la impermeabilización que sea necesario proyectar y construir.

Figura 3-2
Preparación del terreno para la impermeabilización

Figura 3-3
Colocación de polietileno de alta densidad

Criterios corrientemente aplicados para determinar el tipo y características de la impermeabilización lateral y de fondo de un relleno sanitario son los siguientes:

a) Si la población servida es superior a 100.000 habitantes el sistema de impermeabilización recomendado consiste en al menos una membrana sintética con un espesor mínimo de 0,75 mm, salvo en el caso de polietileno de alta densidad, en que dicho espesor no debe ser inferior a 1,52 mm, colocado sobre una capa de arcilla de 60 cm de espesor y coeficiente de conductividad hidráulica (permeabilidad) máxima de 10^{-7} cm/seg o, alternativamente, un sistema de impermeabilización de doble capa separadas por geotextil que garantice condiciones iguales o superiores de impermeabilidad. La distancia desde el fondo del relleno hasta el nivel freático más alto no debe ser inferior a 3 m, debiendo existir entre ambos una capa de suelo con un coeficiente de conductividad hidráulica equivalente no superior a 10^{-5} cm/seg.

   Las membranas más utilizadas para impermeabilización son el polietileno de alta densidad, el polietileno cloro sulfonado (Hypalon) y el cloruro de polivinilo (PVC). En todo caso, las membranas una vez colocadas deben ser protegidas en su sección horizontal con una capa de tierra exenta de piedras y materiales cortopunzantes, o bien con geotextiles sintéticos con el fin de evitar daños producto del paso de la maquinaria al momento de construir las celdas sanitarias.

b) Si la población servida es igual o inferior a 100.000 habitantes, el sistema de impermeabilización mínimo recomendado consiste en una capa de

arcilla de 60 cm de espesor y coeficiente de conductividad hidráulica máxima de 10^{-7} cm/seg o, alternativamente, una capa de suelo o de otro material que garantice condiciones iguales o superiores de impermeabilidad. La distancia desde el fondo del relleno hasta el nivel freático más alto no debe ser inferior a 3 m, debiendo existir entre ambos una capa de tierra con un coeficiente de conductividad hidráulica equivalente no superior a 10^{-5} cm/s.

El uso de arcilla como medio impermeabilizante es bastante común y su desempeño es excelente siempre que se utilicen los espesores adecuados y que su colocación se haga en la forma correcta. La capa de arcilla compactada, debe mantenerse permanentemente húmeda hasta que se cubra con residuos, para evitar su agrietamiento, por lo que se recomienda construir esta impermeabilización en forma progresiva extendiéndola solo lo necesario para avanzar en la ejecución del relleno sanitario. La unión entre el sector ya impermeabilizado con arcilla y el que se va a impermeabilizar a continuación debe hacerse traslapando en forma escalonada la capa impermeabilizante, según se ilustra en la figura siguiente.

c) Para instalaciones que sirven a 20.000 habitantes o menos, es aceptable como impermeabilización la existencia de una capa de suelo natural de al menos 5 metros de espesor con una conductividad hidráulica no superior a 10^{-5} cm/s o una capa equivalente de menor permeabilidad, la que en todo caso debe tener un espesor de al menos 3 m medidos entre el fondo del relleno sanitario y el nivel freático más alto.

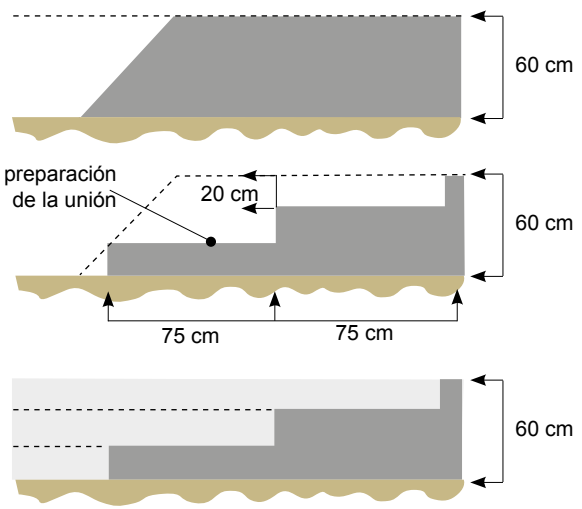


Figura 3-4
Traslape en la unión de impermeabilización con arcilla

3.4 Sistema de control de lixiviados

3.4.1 Generación de lixiviados

Una de las características distintivas de los residuos sólidos domésticos en los países en desarrollo es su alto contenido de humedad, la que es aportada fundamentalmente por la fracción orgánica biodegradable. La proporción de agua contenida en los residuos depende de diversos factores tales como las modalidades del expendio de los insumos utilizados en la preparación de alimentos y los hábitos de consumo de la población, las condiciones climáticas imperantes y las formas de acopio de los residuos a la espera de la recolección.

Bajo condiciones normales, el agua contenida en los residuos es capaz de permanecer retenida al interior de la masa de residuos. La cantidad de líquidos que es capaz de retener una determinada masa de residuos en su interior se denomina Capacidad de Campo. Esta capacidad de campo sin embargo puede verse modificada bajo determinadas solicitaciones físicas o frente a cambios de la estructura química los residuos de forma que si la capacidad de campo es superada para una determinada condición o estado específico, todo el exceso de líquidos será liberado y tenderá a escurrir fuera de la masa de residuos.

La compactación de los residuos, ya sea al momento de construir las celdas sanitarias o debido al sobrepeso al colocar sobreceldas, es capaz de disminuir la capacidad de campo de los residuos dispuestos. Por su parte, los procesos bioquímicos que se desarrollan al interior de un relleno sanitario, junto con modificar la capacidad de campo de los residuos, aportan líquidos orgánicos adicionales, todo lo cual deriva en que se liberen el agua y los compuestos líquidos orgánicos en exceso. A partir del momento en que la basura se encuentra saturada, cualquier aporte de agua externo, ya sea que provenga de escurrimientos superficiales, de precipitaciones o de escurrimientos subterráneos, que ingrese al relleno, lixiviará los desechos arrastrando sólidos en suspensión y compuestos orgánicos en dilución. Esta mezcla heterogénea de alto potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviados o líquidos percolados.

La composición de los lixiviados, depende de muchos factores, entre los que destacan la composición de los residuos y la cantidad de agua infiltrada, en tanto que la cantidad de lixiviados que se generen depende del balance entre el contenido inicial de humedad, la cantidad del agua externa infiltrada, los procesos bioquímicos al interior del relleno y la evaporación. En términos generales, el volumen de lixiviados generado en un relleno es mucho menor que la cantidad de agua infiltrada, de cualquier origen, a su interior.

La generación de lixiviados en un relleno se puede ilustrar mediante el siguiente balance hídrico simplificado:

$$\textbf{Lixiviado} = Pr + AA + HR - (Ev + ES + TB + In)$$

En donde:

Pr = Precipitación
AA = Agua Afluente
HR = Humedad de los Residuos (y del material de cobertura)
Ev = Evaporación
ES = Escorrentía Superficial
TB = Transformación Bioquímica (en la generación de biogás)
In = Infiltración

En el esquema anterior se puede apreciar que el agua afluente, AA, y la escorrentía superficial, ES, son las únicas variables sobre las cuales resulta factible, en la práctica, intervenir a fin de disminuir la generación no controlada de lixiviados, lo que pone de relieve la importancia de asegurar la adecuada cobertura de las celdas, utilizando un material de recubrimiento de baja permeabilidad y dándoles pendientes que permitan el escurrimiento de las aguas de precipitación hacia el exterior del relleno, sin erosionar la cobertura. Asimismo el desvío de las aguas afluentes externas al relleno de manera de impedir su ingreso al relleno será fundamental para evitar la generación excesiva de lixiviados.

Sin perjuicio del control que se ejerza sobre las variables antes mencionadas siempre se genera una cierta cantidad de lixiviados cuyo manejo es necesario definir al momento de formular el proyecto de un relleno sanitario.

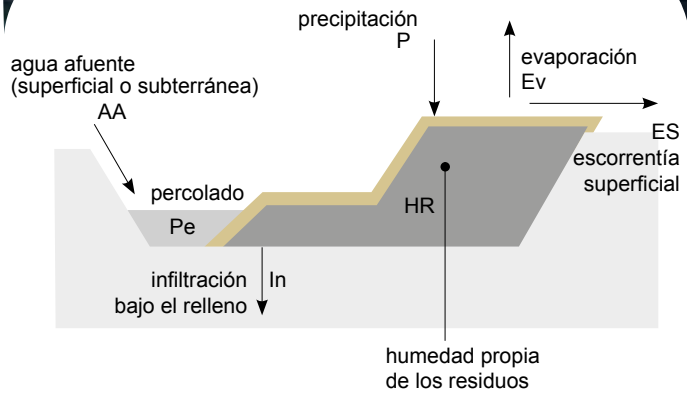
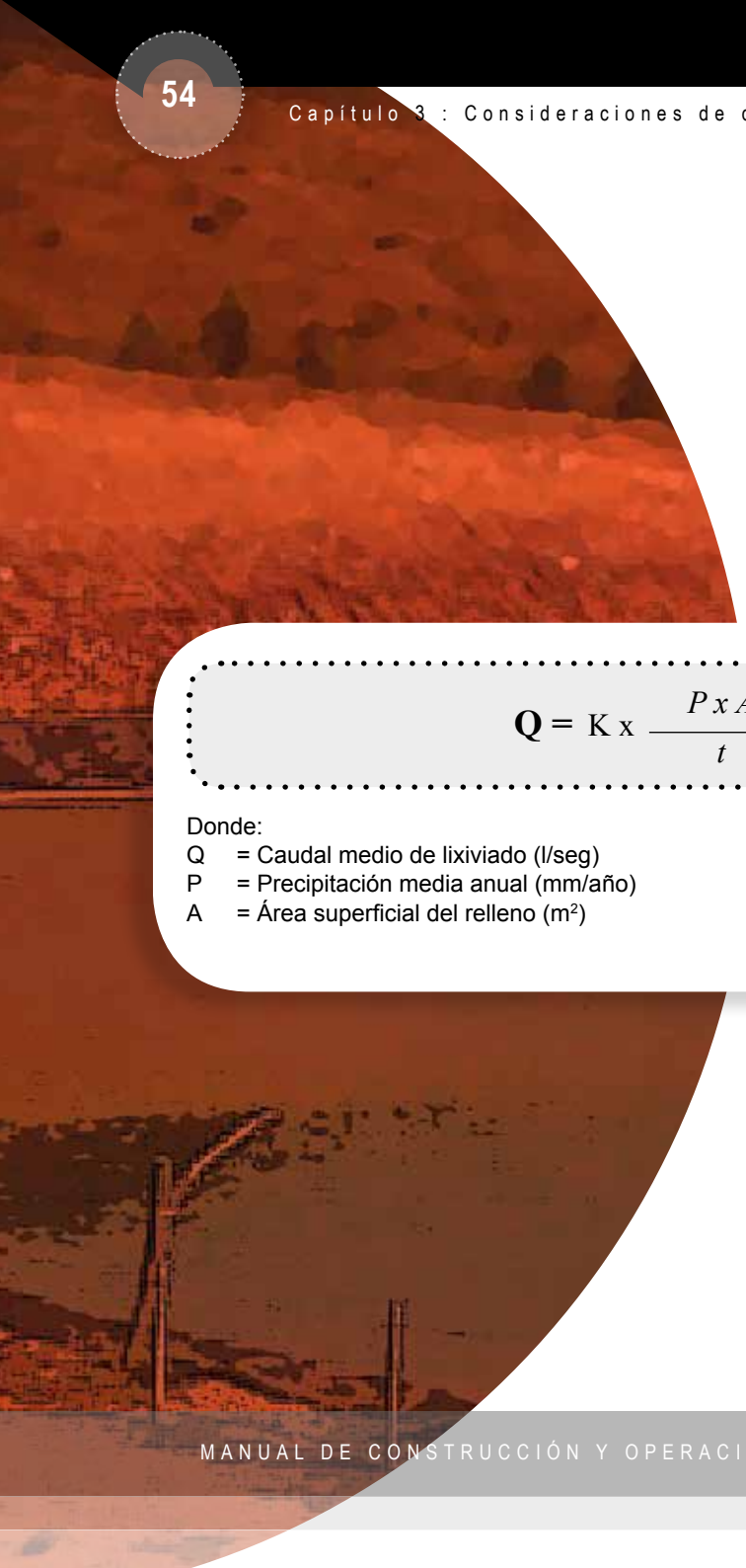


Figura 3-5
Esquema de Balance Hidráulico de generación de percolados/ lixiviados



La cantidad de lixiviados que se genera en un relleno resulta difícil de precisar debido a todos los factores que influyen en su producción, si bien existen modelos que permiten hacer estimaciones razonables de la generación de lixiviados en función de los parámetros más significativos.

Uno modelo ampliamente aceptado para establecer un rango suficientemente confiable respecto al volumen de lixiviados a manejar es el conocido como Método Suizo, que se resume en la ecuación:

$$\mathbf{Q} = \mathrm{K} \times \frac{P \times A}{t}$$

Donde:
Q = Caudal medio de lixiviado (l/seg)
P = Precipitación media anual (mm/año)
A = Área superficial del relleno (m^2)
t = Número de segundos en un año (31.536.000 seg/año)
K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura, cuyos valores recomendados son los siguientes:

- Para rellenos débilmente compactados con peso especifico de 0.4 a 0.7 ton/m^3, se estima una producción de lixiviado entre 25% y 50% (K= 0.25 a 0.50) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

- Para rellenos fuertemente compactados con peso especifico > 0.7 ton/m^3, se estima una generación de lixiviado entre 15% y 25% (K= 0.15 a 0.25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Aplicación del Método Suizo,

a continuación se estima la generación de lixiviados que se esperaría manejar en un relleno sanitario que cubre un área de 160.647 m² (área cubierta en un año de operación por las celdas calculadas en 3.2) ubicado en una zona en donde precipitan en promedio 1.200 mm anualmente.

$$\textbf{Lixiviado} = 0{,}5 \times \frac{1.200 \ \frac{mm}{año} \times 160.647 \ m^2}{31.536.000 \ seg/año} = 3{,}1 \ litros/seg = 264 \ m^3/día$$

Otro modelo igualmente aceptado para estimar la generación de lixiviados a manejar es el desarrollado por el Servicio Alemán de Cooperación Social - Técnica DED – Deutscher Entwicklungsdienst, que estima la generación de lixiviados en función de la precipitación, el área del relleno y la tasa de compactación, según se resume en el cuadro siguiente.

Tipo de relleno	Producción de aguas lixiviadas (% de la precipitación)	Producción de aguas lixiviadas (m³/Há/día)		
		Precipitación 700 mm/año	Precipitación 1.500 mm/año	Precipitación 3.000 mm/año
Relleno manual (compactación baja)	60	11,51	24,66	49,32
Relleno compactado con maquinaria liviana (compactación media)	40	7,67	16,44	32,88
Relleno compactado con maquinaria pesada (compactación alta)	25	4,79	10,27	20,55

Los valores entregados en el cuadro permiten estimar la generación de lixiviados a manejar según dos criterios, uno en función del porcentaje de la precipitación que se infiltra a la masa del relleno y otro en función de un factor asociado a la superficie rellenada.

Aplicación del Método desarrollado por el SACS,

a continuación se estima la generación de lixiviados que se esperaría manejar utilizando los mismos datos del ejemplo anterior (área de 160.647 m^2, precipitación 1.200 mm /año).

Método según precipitación y área rellenada

Área = 160.647 m^2
Lixiviados = 40% de precipitación anual (compactación media)

$$\text{Producción anual de Lixiviados} = \frac{1.200\ mm \times 0{,}40 \times 160.647\ m^2}{1.000} = 77.111\ m^3/año$$

$$= 211\ m^3/día$$

Método según Factor de Generación y área rellenada

Área = 160.647 m^2 = 16,06 Há
Factor de generación = 16,44 m^3/Há/día

$$\text{Producción anual de Lixiviados} = 16{,}06 \text{ Há} \times 16{,}44 \text{ m}^3/\text{Há/día} = 264 \text{ m}^3/\text{día}$$

Es posible apreciar que ambos resultados son perfectamente comparables y que las cifras obtenidas son absolutamente coincidentes con las obtenidas por el método anterior.

3.4.2 Composición de los lixiviados

La composición de los lixiviados prevenientes de un relleno sanitario es muy variable, dependiendo de la etapa de estabilización en que se encuentren los residuos en la zona del relleno que los genera, la dilución que hayan experimentado por aportes de agua externa y la composición de los residuos dispuestos en el relleno. En términos generales los lixiviados provenientes de un relleno sanitario se caracterizan por una alta carga orgánica, -que puede variar entre 10 y 100 veces la carga orgánica de un efluente de alcantarillado-, y contenidos importantes de sales disueltas, compuestos químicos oxidables y metales pesados. En la tabla siguiente se entregan valores que ilustran los rangos dentro de los cuales pueden variar las concentraciones de algunos compuestos químicos contenidos en los lixiviados de rellenos sanitarios tomados de diversas fuentes y estudios hechos en la región.

Valores de referencia de composición de lixiviados/percolados

Componentes	Rango (mg/L)
Cloruros	200 – 10.000
Cobre	0 – 9
Fierro	50 – 2.000
Flúor	0 – 1
Cadmio	0 – 17
Cromo (VI)	0 - 5
Plomo	0 - 10
Sodio	200 – 4.000
Sulfatos	100 – 1.500
Nitratos	5 – 200
Dureza ($CaCO_3$)	300 – 10.000
Solidos Totales Disueltos (STD)	580 - 55.000
DBO_5	2.000 – 60.000
DQO	3.000 – 90.000
pH	5,0 – 8,5

Como ya se ha señalado, los valores anteriores son solo de referencia debido a que la calidad del lixiviado depende del tipo de relleno, condiciones climáticas y tipo de basura. Además, teniendo en cuenta que dentro del relleno sanitario se producen procesos de estabilización química, biológica y física, la calidad del líquido evolucionará a través del tiempo, tendiendo desde un líquido con alto nivel de contaminación a un líquido relativamente inocuo, tal como se ilustra en los gráficos siguientes.

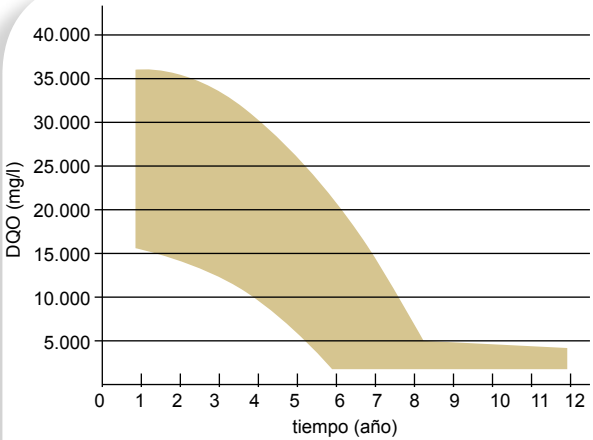


Figura 3-6
Evolución de la Demanda Química de Oxígeno, DQO, en los lixiviados/percolados

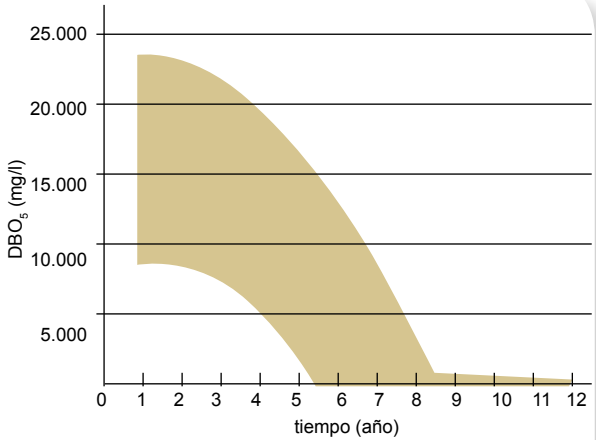


Figura 3-7
Evolución de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO_5, en los lixiviados/percolados

3.4.3 Diseño de obras para el control de lixiviados

Considerando el potencial contaminante de los lixiviados es importante, tratándose de rellenos sanitarios mecanizados, adoptar las medidas necesarias para mantenerlos bajo control, evitando en lo posible su generación y, de ser necesario, previendo su almacenamiento y/o tratamiento posterior.

Figura 3-8
Canal típico de interceptación perimetral de aguas lluvias Relleno Sanitario de Comayagua, Honduras.

Figura 3-9
Captación de aguas lluvias por canal de interceptación

3.4.3.1 Zanjas de interceptación aguas superficiales

En los sitios donde la escorrentía de aguas pluviales procedente de los alrededores puede ingresar al relleno se debe prever la instalación de un sistema de interceptación perimetral convenientemente diseñado. El sistema de interceptación se puede diseñar para captar y evacuar hacia el exterior del relleno solamente la escorrentía de la periferia o bien para evacuar además las aguas lluvias no contaminadas caídas sobre la superficie del relleno.

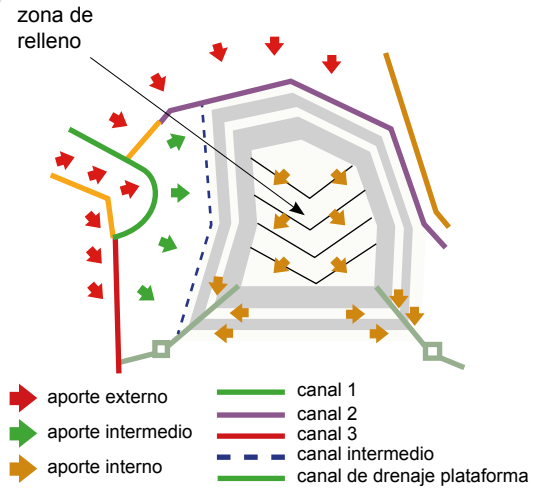


Figura 3-10
Esquema de sistema de interceptación de las aguas lluvias del área aportante impidiendo su ingreso a la zona de relleno

En lugares donde no hay riesgo de escorrentías externas al relleno y solamente es necesario evacuar el agua de precipitación desde la superficie del relleno, deben diseñarse zanjas para encausar el flujo de las aguas de precipitación. En muchos diseños se utilizan una serie de canales interceptores que empalman con un canal principal de mayor capacidad que conduce el conjunto de las aguas recolectadas hacia el exterior del relleno.

3.4.3.2 Diseño de un sistema de manejo de aguas lluvias

Cálculo de Caudal de Crecida

El cálculo de caudales de crecida a interceptar por un sistema de zanjas puede hacerse mediante el empleo de la Fórmula Racional. La aplicación de este método requiere determinar la superficie de la cuenca aportante (A), el coeficiente de escorrentía (C) y una intensidad de precipitación de diseño (I), ésta última es la correspondiente al tiempo de concentración y al período de retorno adoptado.

El tiempo de concentración, es el tiempo que tarda una gota de agua en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de interés.

La ecuación correspondiente a la fórmula racional es:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3{,}6}$$

Donde:
Q = caudal en m^3/s
A = área aportante en km^2
I = intensidad en mm/hora

La intensidad puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$I = \frac{CD_t \times P_{24}^T}{t}$$

Donde:

CD_t = coeficiente de duración

P_{24}^T = precipitación de una lluvia de duración t y período de retorno T, y P24 es la precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de T años.

t = tiempo de concentración

Para el cálculo de caudales de crecidas se puede utilizar la fórmula de Giondotti:

$$t = 4 \times \sqrt{A} + 1.5 \times \left(\frac{L}{0.8}\right) \times \sqrt{H1}$$

Donde:
A = área aportarte en km2
L = longitud del cauce principal en km.
H1 = desnivel en metros.

Conjuntamente con lo anterior, para efectos de calcular los caudales de diseño es necesario conocer el comportamiento de la lluvia en función de la duración del evento, para lo cual es necesario determinar los coeficientes de duración.

El coeficiente de duración está definido por la ecuación:

$$CD_t = \frac{P_t^T}{P_{24}^T}$$

El tiempo de retorno T debe ser establecido conforme a los criterios de diseño y niveles de seguridad utilizados en cada país. Algunos países recomiendan para T 200 años, sin embargo la bibliografía internacional se mueve en rangos de 25 a 100 años (ISWA trabaja en rangos inferiores a 50 años, para vidas útiles proyectadas menores a este lapso).

De acuerdo con la Fórmula Racional, para el cálculo del caudal de crecidas es necesario conocer el coeficiente de escorrentía, este valor depende de condiciones y características de cada cuenca en particular: permeabilidad del suelo, vegetación y capacidad de campo. Valores de referencia o métodos para su determinación se encuentran disponibles en la literatura técnica referente a la construcción de sistemas de drenaje de aguas lluvias.

3.4.3.3 Dimensionamiento de zanjas de interceptación

El dimensionamiento de las zanjas de interceptación se hace mediante la aplicación de fórmulas convencionales de flujo a superficie libre o descubierto. Para ello se deben considerar los aumentos de caudal aguas abajo, las pendientes de cada tramo, los remansos que se generan por cambios de pendiente y la localización de la estructura de caída.

La relación entre caudal y nivel en secciones dadas, está definida por la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Donde:
Q = caudal en m^3/s
A = sección da la zanja en m^2
R = radio hidráulico en m
S = pendiente del canal en m/m
n = coeficiente rugosidad

Tradicionalmente la geometría de las zanjas de interceptación de aguas lluvias construidas en rellenos sanitarios es de sección trapezoidal con pendientes laterales que varían entre el 1:1 y 1:2 (Vertical:Horizontal).

En la siguiente figura se muestran algunos diseños tipo de zanjas si bien, tratándose de rellenos sanitarios, es poco frecuente el uso de revestimientos, salvo que se trate de proteger rellenos de seguridad destinados a disponer residuos peligrosos o de rellenos sanitarios gran tamaño.

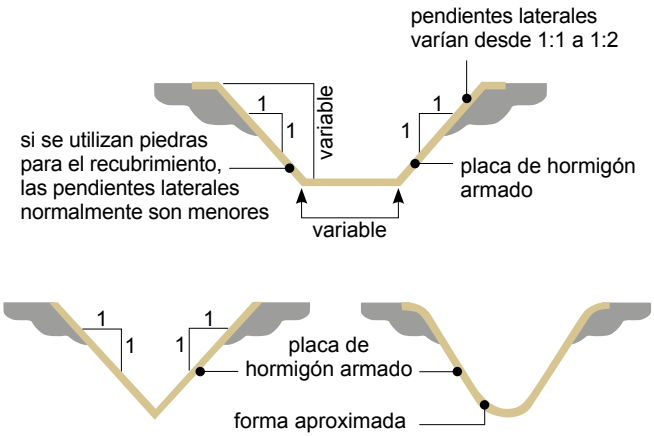


Figura 3-11
Esquema de drenajes superficiales usados en rellenos sanitarios

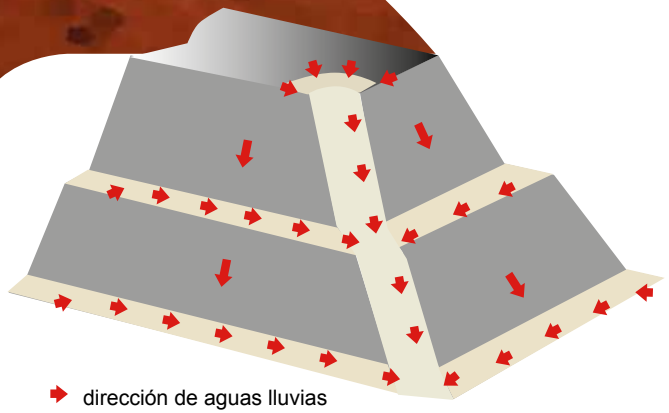


Figura 3-12
Direccionamiento de las aguas lluvias en la superficie del relleno sanitario. Las aguas escurren hacia las esquinas permitiendo su evacuación hacia canales interceptores existentes fuera del área de relleno

3.4.3.4 Interceptación de aguas superficiales al interior del relleno

Adicionalmente a la interceptación de aguas lluvias perimetrales, es necesario diseñar un sistema que permita un manejo de las aguas lluvias que precipitan directamente sobre los sectores ya rellenados y sobre las áreas preparadas para rellenar.

Con este fin es importante prever pendientes apropiadas para las superficies superiores de las celdas y emplazar canaletas de encausamiento que

Figura 3-13
Conducción de las aguas lluvia hacia vías preferenciales de salida protegidas, las cuales confluyen en las esquinas hasta vías de evacuación

Figura 3-14
Evacuación de aguas lluvia desde la superficie superior del relleno sanitario a través de canales interceptores

permitan un escurrimiento desde la superficie superior de las celdas hacia sectores externos, sin erosionar la cobertura.

El diseño de todo relleno sanitario debe considerar pendientes no menores al 2% ni mayores al 5% en las superficies superiores de las celdas sanitarias. Una pendiente mayor al 2% permite asegurar el fácil escurrimiento de las aguas de precipitación hacia los costados de las celdas, minimizando de esta forma su infiltración al interior del relleno y su posterior contaminación con lixiviados, en tanto que una pendiente menor al 5% minimiza la posibilidad de escurrimientos demasiado rápidos, capaces de erosionar y remover el material de cobertura.

En algunos casos, dependiendo de la configuración del relleno y del régimen de precipitaciones, resulta conveniente prever además lagunas de almacenamiento con el objeto de bombear hasta ellas las aguas de apozamiento que se producen debido a los asentamientos diferenciales en las zonas ya rellenadas.

Figura 3-15
Estanque de almacenamiento de aguas lluvias

3.4.3.5 Estanques para el almacenamiento del agua pluvial

En muchos casos puede ser necesaria la construcción de estanques para contener los flujos de aguas lluvias desviados desde las superficies superiores del relleno, minimizando así los riesgos de inundaciones en las zonas bajas. Normalmente, se deben recoger las

aguas de precipitación tanto en las zonas rellenadas del vertedero como en las zonas aún no rellenas. Estas aguas están sujetas a procesos de evaporación, y dado que se trata de aguas no contaminadas, sus remanentes pueden ser utilizados posteriormente en la humectación de caminos, riego y otros usos similares.

3.4.3.6 Sistema de drenaje de lixiviados

Dados los inconvenientes que el afloramiento de lixiviados por los taludes de las celdas sanitarias puede causar a la operación de un relleno, en aquellas zonas en donde la precipitación es importante y tratándose de rellenos sanitarios mecanizados, se requiere diseñar un sistema de drenaje de fondo que permita su evacuación controlada ya sea gravitacionalmente o mediante bombeo.

En aquellos casos en que, -dados el tamaño y diseño de un relleno y las características climáticas de la zona en que éste se encuentre emplazado-, sea necesario poner un sistema de drenaje de fondo, un punto importante a tener en cuenta al diseñar el relleno sanitario es la conveniencia de separar las aguas lluvia que precipiten directamente dentro del área de rellenamiento aún no utilizada de los lixiviados que se generen en la parte en que ya se han construido celdas sanitarias.

En el caso de ser necesario contar con un sistema de drenaje para evacuar los lixiviados desde el fondo del relleno hasta la laguna de almacenamiento, se dispondrán canaletas de drenaje, las que a su vez conectarán con las tuberías de drenaje, que serán las encargadas de conducir los lixiviados hasta un colector común conectado con el tubo de evacuación destinado a conducir los lixiviados hasta la laguna de almacenamiento. Para estos efectos, conviene dar pendientes adecuadas a la base del relleno, -del orden del 1 al 5%-, hacia las canaletas de drenaje de forma de facilitar el escurrimiento de los lixiviados que alcanzan el fondo del relleno. Estas canaletas, a su vez, se conectarán con las tuberías de drenaje antes mencionadas. Al interior de las canaletas de drenaje se coloca un tubo, perforado o ranurado, de manera de facilitar el escurrimiento de .los lixiviados hacia las tuberías de drenaje. El espacio no ocupado por los tubos perforados al interior de las canaletas de drenaje se rellena con grava limpia, o lavada, de 3,5 a 5 cm (figura 3-17). Las tuberías de drenaje deberán tener una pendiente del orden del 0,5 al 1% hacia el colector (figura 3-18).

Una forma de dar cuenta de la necesidad de separar las aguas no contaminadas de aquellas que han estado en contacto con los lixiviados, en aquellos casos en que el vaso del relleno es de gran tamaño, consiste en independizar el área de operación del resto del fondo del relleno mediante muros o barreras transversales de contención de 0,8 a 1 m de altura. Las canaletas de drenaje al interior del área de operación se conectan con la porción de tuberías de drenaje que quedó dentro de esa misma área. A medida que se van habilitando nuevas áreas de operación, las correspondientes canaletas de drenaje

se van conectando a la porción correspondiente de tuberías de drenaje, previo a comenzar el depósito de residuos. Las bocas de conexión pueden dejarse instaladas en los puntos correspondientes al momento de construir las tuberías de drenaje, manteniéndolas selladas hasta la habilitación de la respectiva área de operación. Los muros o barreras transversales de contención usualmente se diseñan a distancias equivalentes al avance de una o dos celdas sanitarias.

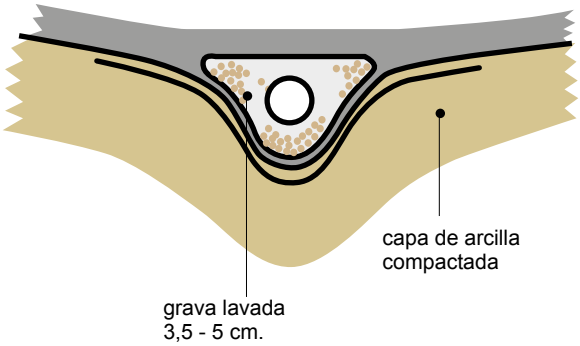


Figura 3-16
Corte de canaleta de drenaje de fondo

3.4.3.7 Laguna de almacenamiento de lixiviados.

Por su alto potencial contaminante, los lixiviados frescos evacuados de un relleno sanitario no pueden ser derivados directamente a masas y cursos de agua, por lo que se requerirá de una capacidad de almacenamiento en lagunas que evite su escurrimiento incontrolado fuera de los límites del predio en que se ubica el relleno.

Las lagunas de almacenamiento de lixiviados deben tener una impermeabilización lateral y de fondo que asegure una estanqueidad al menos similar a la del relleno sanitario, pero en ningún caso la permeabilidad debe ser superior que la equivalente a la de una capa de arcilla con un coeficiente de conductividad hidráulica de 10^{-7} cm/s y un espesor de 60 cm.

El volumen de acumulación de las lagunas puede estimarse de acuerdo a los métodos expuestos anteriormente, tomando como cifra de diseño el

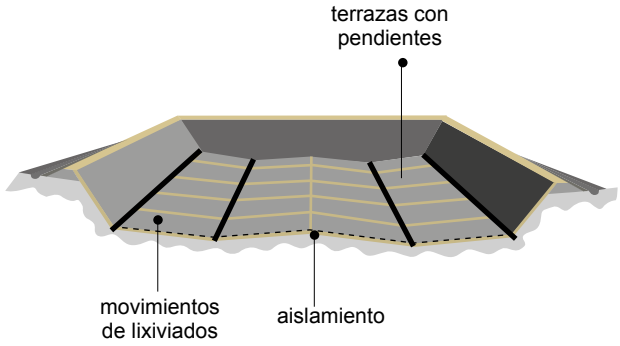


Figura 3-17
Red de drenaje de fondo dispuesta en el fondo del vaso

Figura 3-18
Laguna de almacenamiento de lixiviados Relleno Sanitario de Comayagua, Honduras.

valor más desfavorable obtenido, -a menos que consideraciones técnicas fundadas permitan adoptar cifras menores-, y considerando un volumen de almacenamiento suficiente para contener los lixiviados en la estación más lluviosa aplicando las medidas de manejo antes mencionadas. Su área superficial se dimensionará conforme a un equilibrio entre la generación anual estimada de lixiviados, la precipitación que cae directamente sobre el espejo de agua de la laguna y la tasa promedio anual de evaporación superficial correspondiente a la zona de emplazamiento del relleno. Las dimensiones podrán reducirse si el proyecto prevé algún manejo adicional, tal como recirculación de parte de los lixiviados al interior del relleno o el tratamiento de alguna fracción de lixiviados.

En los casos en que se trate de rellenos sanitarios diseñados en zanjas, pozos o depresiones capaces de contener la totalidad de los residuos a disponer, se puede considerar el total confinamiento de los lixiviados al interior de la masa de basuras. En tales casos el diseño debe contemplar una cobertura final que minimice la infiltración del agua de precipitación hacia el interior del relleno y la consecuente generación de lixiviados, de forma de asegurar que no se produzcan rebalses o afloramientos.

3.5 Sistema de control de biogás

3.5.1 Generación de biogás

Una fracción importante de los residuos que llegan a los rellenos sanitarios corresponde a materia orgánica biodegradable, la que entra rápidamente en un proceso de descomposición por la acción de los microorganismos, -presentes en los residuos y en la tierra de cobertura-, que utilizan esta materia orgánica como nutriente.

La descomposición de los residuos es un fenómeno complejo en el cual los microorganismos, mediante un proceso enzimático, rompen los enlaces de las moléculas orgánicas, descomponiéndolas en sustancias más simples, desprendiendo energía en forma de calor. Al interior de un relleno sanitario este proceso se desarrolla en cuatro fases, de las cuales, la primera corresponde a una etapa esencialmente aeróbica, en tanto que las tres fases siguientes configuran la etapa anaeróbica.

La descomposición aeróbica es un proceso que se desarrolla en presencia de oxígeno y dentro de la celda sanitaria este tipo de descomposición tiene una duración relativamente corta, de solo algunos días. En los rellenos sanitarios esta fase se sustenta con el aire que queda atrapado en la celda luego de poner el material de cobertura y se extiende hasta que el oxígeno atmosférico atrapado al interior de la celda es totalmente consumido. En este proceso se generan algunos ácidos orgánicos, dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua. Al finalizar esta fase aeróbica resta aún una cantidad importante de materia orgánica sin descomponer.

Una vez que se agota el oxígeno atmosférico presente al interior de la celda sanitaria comienza la etapa anaeróbica. La degradación anaeróbica es un proceso que se desarrolla en ausencia de oxigeno y, en la celda sanitaria, tiene una duración que puede extenderse por años y décadas. En esta etapa es posible diferenciar tres fases adicionales distintas. Luego de la primera fase aeróbica ya mencionada comienza una fase anaeróbica no metanogénica, cuya duración se extiende por algunas semanas, seguida de una fase metanogénica inestable, de algunos meses de duración, para luego dar paso a la fase metanogénica estable que se extiende por años. Estas dos últimas fases son anaeróbicas estrictas. En la fase metanogénica inestable, la proporción de metano en el biogás se incrementa progresivamente hasta alcanzar porcentajes algo superiores al 50%. Por su parte, la fase metanogénica estable deriva su nombre del hecho que la composición del biogás se mantiene relativamente constante con porcentajes superiores al 50% de metano y porcentajes algo menores al 50% de dióxido de carbono, si bien durante toda esta fase la tasa de generación de biogás al interior la celda sanitaria decrece exponencialmente.

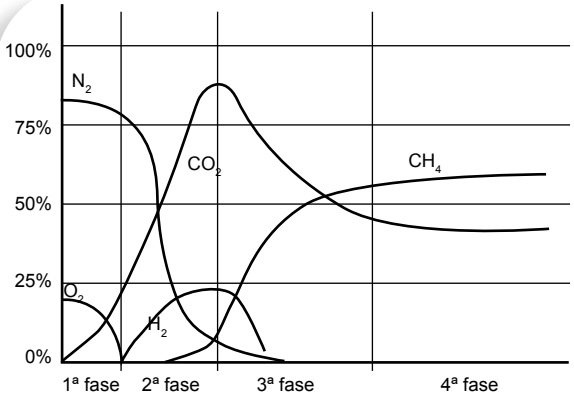


Figura 3-19
Evolución de la composición del biogás generado al interior de una celda sanitaria

En la fase metanogénica estable los microorganismos anaeróbicos utilizan los ácidos orgánicos como nutrientes liberando la mezcla gaseosa de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), junto a pequeñas cantidades de amoniaco (NH_3), acido sulfhídrico (H_2S) y mercaptanos. Esta mezcla de gases constituida fundamentalmente por dióxido de carbono y metano en partes aproximadamente iguales es la que corrientemente se denomina biogás.

La generación potencial de metano en rellenos sanitarios de residuos sólidos no especiales es del orden de 60 m^3 a 120 m^3 por tonelada de residuo. Si se considera que el metano y el dióxido de carbono están presentes en cantidades similares en el biogás, la generación potencial de biogás en un relleno sanitario es del orden de 120 m^3 a 240 m^3 por tonelada.

Una forma de estimar la generación potencial total de biogás al interior de una celda sanitaria consiste en realizar el cálculo estequiométrico de la descomposición de una unidad de masa de materia orgánica suponiendo una transformación completa de ésta a través de un proceso característico de la fase metanogénica estable y asumiendo una molécula teórica representativa de la composición de la materia orgánica de los residuos que se depositan en el relleno sanitario, según la siguiente ecuación:

$$C_a H_b O_c N_d S_e + \tfrac{1}{4}(4a - b - 2c + 3d + 2e) H_2O \longrightarrow \tfrac{1}{8}(4a + b - 2c - 3d - 2e) CH_4$$
$$+ \tfrac{1}{8}(4a - b + 2c + 3d + 2e) CO_2 + d\, NH_3 + e\, H_2S$$

La cifra que se obtiene de la estimación anterior representa la generación máxima potencial, suponiendo que la totalidad de la materia orgánica biodegradable sufre un proceso completo de descomposición al interior del relleno, lo que en la práctica difícilmente sucede. Por otra parte, no todo el biogás generado en el seno de un relleno es recuperable debido a la cinética propia del proceso de generación de biogás y a las inevitables pérdidas por migración tanto lateral como superficial, lo que está directamente relacionado con las obras de impermeabilización lateral de relleno y con las características de la cobertura de las celdas.

La experiencia en países latinoamericanos indica que la cantidad de biogás aprovechable económicamente como fuente de energía alcanza aproximadamente a 100 m^3 de biogás por tonelada residuos dispuesto en un relleno. Lo anterior debido a que una fracción del biogás generado se pierde por escape superficial y a que parte importante del biogás se produce en zonas antiguas de rellenamiento a tasas en que no resulta económica su captación.

Las tasas a las cuales se genera el biogás dependen de innumerables factores entre los que cabe mencionar la temperatura, la humedad y el tipo y cantidad de materia orgánica biodegradable que ingresa al relleno, si bien es posible afirmar que conforme a la cinética que rige los procesos microbiológicos que se desarrollan al interior de la celda sanitaria, la tasa de generación aumenta rápidamente hasta alcanzar un máximo para, a partir de ese punto, comenzar a decrecer en forma exponencial en un proceso que se extiende por años, como se ilustra en la figura 3-21.

Al interior del relleno, cada celda diaria sufre un proceso similar al anteriormente descrito, solo que desfasado

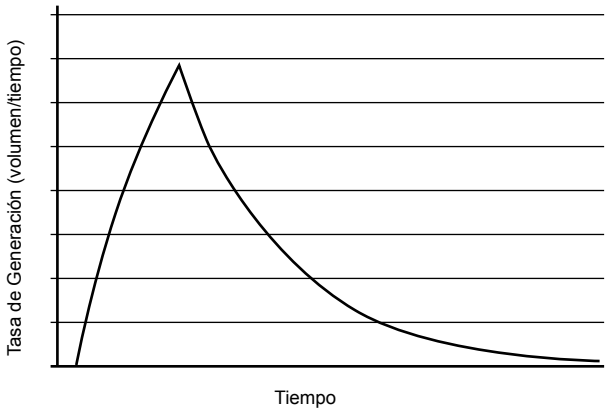


Figura 3-20
Curva típica de la tasa de generación de biogás al interior de una celda sanitaria

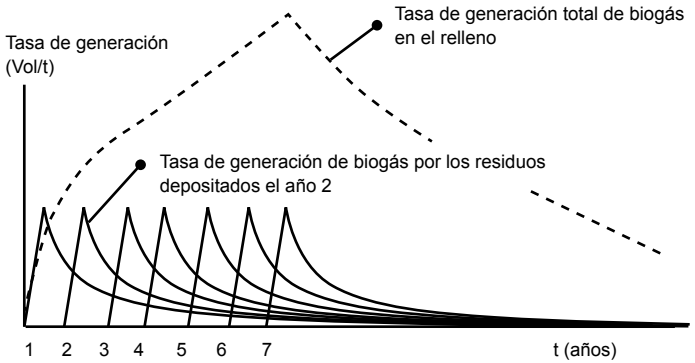


Figura 3-21
Evolución de la tasa de emisión total de biogás en un relleno sanitario

en el tiempo, de forma que la tasa de generación total del relleno en cada momento corresponde a la suma de las contribuciones que realiza cada celda individual en su respectivo estado de estabilización. Con el fin de simplificar el cálculo de la tasa total de generación de biogás el análisis puede hacerse tomando como unidad de referencia los residuos dispuestos cada año. La curva obtenida muestra que la tasa total de generación se incrementa regularmente durante la operación del relleno para decrecer bruscamente con una curva de tipo exponencial a partir del momento en que el relleno deja de operar. La figura 3-22 ilustra lo descrito. Existen modelos computacionales que permiten calcular las tasas de generación en un relleno sanitario y estimar de esta forma las posibilidades de aprovechamiento del biogás. Un modelo comúnmente utilizado para estos efectos es el desarrollado para la US EPA llamado LandGEM, versión 302.

3.5.2 Composición del biogás

El biogás generado en la fase metanogénica es un gas combustible, -propiedad que le confiere el metano presente en la mezcla-, lo que hace que deba ser manejado con especial cuidado para evitar su migración incontrolada fuera de los límites del relleno o la formación de bolsones de mezcla explosiva al combinarse con el oxígeno presente en el aire. Adicionalmente, el escape incontrolado de biogás puede causar problemas a la comunidad debido a la presencia de compuestos malolientes, tales como sulfuro de hidrógeno y mercaptanos.

En la siguiente tabla se presentan concentraciones habituales de distintos componentes del biogás generado en rellenos sanitarios durante la fase metanogénica estable, que es la más relevante y la de mayor duración en todo el proceso de estabilización de la materia orgánica biodegradable presente en los residuos.

CH_4 % volumen base seca	CO_2 % volumen base seca	NH_3 % volumen base seca	H_2S % volumen base seca
40 - 60	40 - 60	0,1- 1	0 - 1

En aquellos casos en que se dispone de información respecto de la molécula representativa de la composición química de la materia orgánica que llega al relleno, es posible estimar la composición del biogás para dicho caso en particular, utilizando la relación estequiométrica entregada en el acápite 3.5.1 anterior.

3.5.3 Diseño de obras para el control del biogás

El biogás tiene un valor como recurso energético, sin embargo cuando éste no es aprovechado, el biogás generado al interior de un relleno sanitario debe ser adecuadamente eliminado mediante dispositivos e instalaciones apropiadas que permitan evitar riesgos de explosiones y migraciones a través del subsuelo.

El manejo adecuado del biogás producido al interior del relleno se logra mediante la instalación de drenes o chimeneas que permitan su salida controlada y su

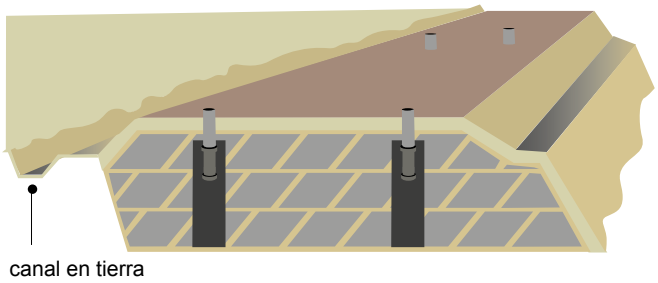


Figura 3-22
Chimeneas para la evacuación del biogás generado al interior del relleno sanitario

Figura 3-23
Chimenea de gavión de estructura de madera

captación para su quema o aprovechamiento. Para evacuar en forma adecuada y segura el biogás desde el interior del relleno se requiere disponer chimeneas de evacuación a distancias no mayores del doble de su radio de influencia, de forma de cubrir la totalidad de la superficie del relleno.

En el caso de rellenos sanitarios de una altura total inferior a seis metros se puede omitir la colocación de chimeneas de evacuación de biogás dado que en estos casos la alta relación superficie volumen hace que los procesos normales de escape superficial adquieran especial relevancia, evitando la acumulación de cantidades significativas de biogás al interior de la masa del relleno.

La extracción del biogás desde el interior del relleno mediante chimeneas puede hacerse en forma pasiva o forzada. En la extracción pasiva el biogás fluye naturalmente hacia las chimeneas debido a la diferencia de presiones entre el interior del relleno y el exterior. En la extracción forzada se aplica una succión mediante bombas de extracción.

Cuando se utiliza la extracción pasiva el radio de influencia de las chimeneas es del orden de los 15 m a 30 m, por lo que el proyecto del relleno debe contemplar la colocación de chimeneas de extracción a distancias dentro de un rango de 30 a 60 metros. Cuando se utiliza extracción forzada el radio de influencia debe ser obtenido en terreno midiendo la distancia entre los pozos de extracción y los correspondientes puntos en los cuales se mide en forma estable una presión negativa cercana a cero.

Existen diversos tipos y diseños de drenes o chimeneas para extraer el gas desde el interior de un relleno sanitario. Un diseño muy utilizado por su buen desempeño y bajo

costo es la chimenea tipo gavión, que consiste en una estructura de madera o metálica rodeada exteriormente de una malla de alambre y rellenada en su interior con material pétreo de canto rodado de 2 a 8 pulgadas de diámetro. Las secciones de la estructura metálica o de madera oscilan entre 0,6 m^2 y 1 m^2.

Otro diseño también utilizado con frecuencia consiste en tambores metálicos perforados unidos por medio de anillos metálicos y rellenos con material pétreo similar al anterior, si bien este diseño en ocasiones presenta problemas por obstrucción de las perforaciones con los plásticos presentes en los residuos (Figura 3-26).

En rellenos de alta compactación se utilizan fundas metálicas que se rellenan con material pétreo y se elevan mediante equipo mecanizado en la medida que el relleno crece en altura. Las fundas están provistas de asas que permiten su elevación. La chimenea de piedra mantiene su continuidad y se sustenta estructuralmente gracias a la alta compactación que se le da a los residuos en este tipo de rellenos.

Figura 3-24
Chimenea de tambores perforados que se rellena con material pétreo. Relleno sanitario de Comayagua, Honduras.

Figura 3-25
Chimenea de tambor con perforaciones obstruidas por material plástico

3.6 Obras anexas

3.6.1 Vías de acceso

El recinto debe contar con una o más vías de acceso en buen estado y con el ancho y las pendientes adecuadas para permitir el tránsito fluido de

los vehículos que transportarán los residuos al relleno sanitario. Estos caminos deben tener los elementos de protección que eviten la interrupción de la circulación por inundaciones o derrumbes. Los caminos no necesariamente deben ser pavimentados, siendo aceptables caminos cubiertos con material estabilizado. Es importante asegurar un buen diseño que permita la circulación en toda época del año y en lo posible el tránsito de dos vehículos.

Figura 3-26
Vía de acceso pavimentada hasta oficinas e instalaciones de servicio con conexión a caminos internos que llegan al frente de trabajo.

3.6.2 Cierre perimetral

Todo el perímetro del área comprendida por el proyecto debe contar con un cierre, éste puede ser un cerco opaco y sólido de albañilería o prefabricado o estar constituido por postación y malla metálica, dependiendo del tamaño y ubicación de la obra. Rellenos sanitarios de tamaño mediano y grande, ubicados cercanos sitios poblados o de circulación importante de personas, justifican la inversión en cercos opacos de material sólido, en tanto que rellenos de tamaño medio o pequeño ubicados en áreas rurales de baja circulación de personas pueden cerrarse con cercos de malla metálica.

El cerco perimetral debe tener una altura mínima de 1.80 m que impida el acceso de animales mayores y de personas ajenas a las faenas propias del relleno.

El lugar de ingreso al relleno sanitario deberá contar con un portón y una caseta que permitirá que llevar las tareas de registro y control de ingreso.

3.6.3 Balanza

Posterior al control de ingreso se debe prever la instalación de pesaje que puede ser una balanza mecánica o electrónica conectada a un sistema computacional que permita un buen control de los residuos ingresados y el adecuado manejo de la información.

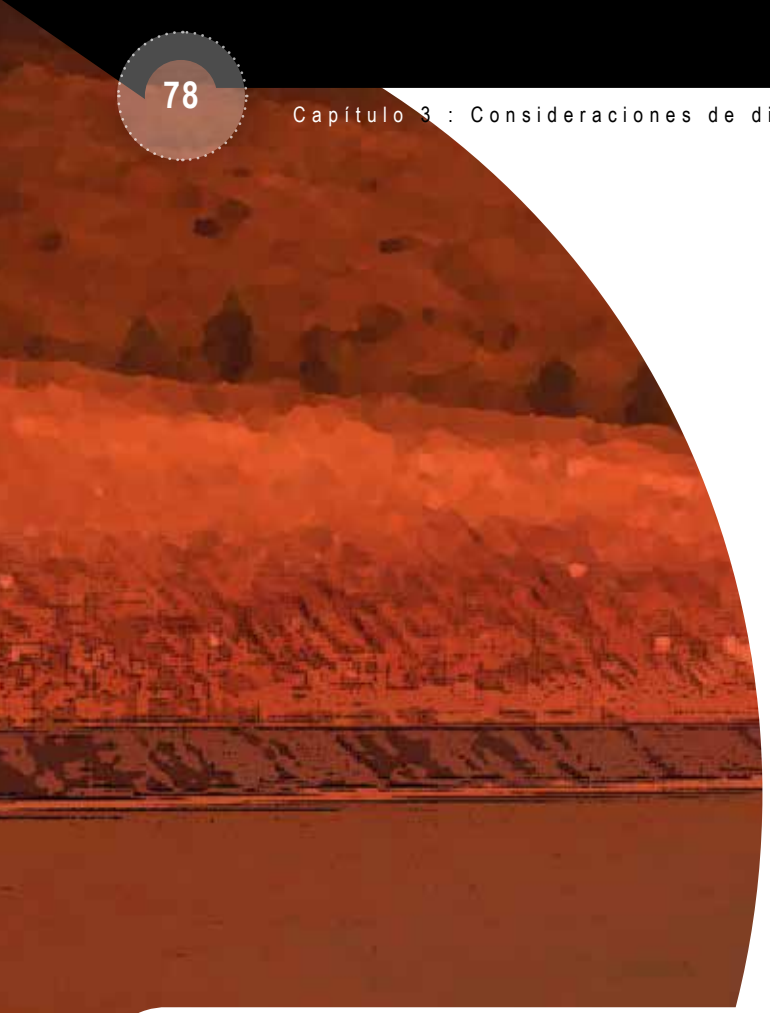
Los rellenos de gran tamaño pueden requerir la instalación de dos o más balanzas, de manera de impedir la acumulación de una gran cantidad de vehículos en la entrada durante las horas de alta frecuencia de llegada de camiones recolectores. En los rellenos que atienden a una población total menor de 50.000 habitantes puede omitirse la instalación de balanzas de pesaje, así como también en aquellos rellenos de cualquier tamaño que reciban única y exclusivamente vehículos provenientes de una estación de transferencia con pesaje de salida.

Figura 3-27
Cerco perimetral y caseta de vigilancia al ingreso

Figura 3-28
Instalación del sistema de pesaje y caseta de control en el punto de ingreso a un relleno sanitario Relleno sanitario de Comayagua, Honduras.

3.6.4 Oficinas y bodegas

Dependiendo del tamaño del relleno sanitario se requieren una serie de obras anexas adicionales con el fin de realizar las actividades de administración del recinto y posibilitar el resguardo y mantenimiento del equipo, las maquinarias y los materiales. En tal sentido es necesario prever instalaciones de oficinas administrativas, bodegas, galpón y taller para maquinarias, entre otros.



3.6.5 Instalaciones para el personal

El relleno sanitario deberá estar provisto de servicio de agua potable, alcantarillado, electricidad y comunicación. Lo ideal es poder conectarse a redes existentes, en caso contrario, debe recurrirse al uso de depósitos para mantener el agua suficiente que requiere el personal de la obra, un sistema de fosa séptica y pozo o drenes absorbentes, un sistema generador de electricidad y un sistema de comunicación en base a radio con batería o telefonía móvil.

Debe preverse instalaciones suficientes para el personal, las que deben incluir al menos, servicios higiénicos, vestidores, comedores y sala de primeros auxilios. El espacio y número de artefactos higiénicos dependerá de la cantidad de personas que trabajen en el relleno y de la reglamentación aplicable vigente. A modo de referencia se entrega la siguiente tabla de cantidad y tipo de artefactos según número de trabajadores.

N° de personas que laboran por turno	Excusados con taza de W.C.	Lavatorios	Duchas
1 - 10	1	1	1
11 - 20	2	2	2
21 - 30	2	2	3
31 - 40	3	3	4

3.6.6 Instalaciones de vigilancia

El proyecto debe incluir las instalaciones para albergar al personal de vigilancia. En instalaciones de gran tamaño usualmente se utilizan casetas de observación estratégicamente instaladas y dispositivos de comunicación rápida para este fin.

Figura 3-29
Caseta de vigilancia. Vigilancia al ingreso

3.6.7 Obras de mitigación

Un relleno sanitario es un faena en donde existe una circulación importante de vehículos, (tales como camiones recolectores, camiones de transporte de material de cobertura, etc.), opera maquinaria pesada de movimiento de tierra en forma prolongada durante la jornada de trabajo y se maneja un material, -los propios residuos-, agresivo desde el punto de vista ambiental y estético, todo lo cual hace necesario disponer de ciertas barreras y adoptar ciertas prácticas para disminuir y mitigar, tanto como sea posible, molestias a la población y daños al medio ambiente.

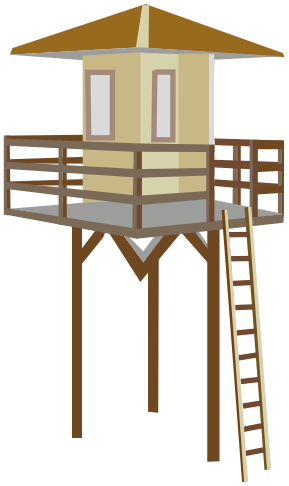


Figura 3-30
Caseta de Perimetral Interna

3.6.8 Área de protección

La actividad propia del relleno sanitario es fuente de ruido, eventual suspensión de material particulado y generación de olores durante la descarga y acomodo de los residuos, todo lo cual puede ser causa de molestias a la población aledaña. Lo anterior hace

recomendable establecer un área de protección en la que durante la vida útil y el cierre de la instalación no existan ni se puedan construir edificios destinados a uso habitacional o de servicios.

Para efectos de delimitar el área de protección se recomienda dejar una distancia de entre 150 m a 300 m entre el área exterior y la zona en donde se contempla disponer los residuos así como toda instalación anexa al relleno sanitario capaz de generar olores ofensivos, tales como plantas de tratamiento y lagunas de almacenamiento de lixiviados, zona de lavados de camiones y zona de pesaje, etc.

3.6.9 Cercos vivos y barreras arboladas

El establecimiento de cercos vegetales y barreras de árboles contribuye a mejorar la estética de la instalación y a disminuir la diseminación de malos olores y el arrastre de material particulado por acción del viento. La recomendación en estos casos es utilizar especies vegetales propias de la zona para asegurar su crecimiento y desarrollo.

3.7 Instalaciones para la recepción de residuos especiales al interior de un relleno sanitario

3.7.1 Residuos de Establecimientos de Atención Salud (REAS)

3.7.1.1 Celdas para la disposición de REAS

Un relleno sanitario puede recibir residuos especiales no tratados de establecimientos de atención de salud (residuos patológicos, material cortopunzante, residuos de cultivos de laboratorio, residuos contaminados con sangre, etc.) siempre que habilite para disponerlos una zona de disposición separada e independiente del relleno sanitario de residuos sólidos domesticos.

Las celdas para recibir residuos espéciales provenientes de los establecimientos de atención de salud deben ser tipo zanja y contar con una

impermeabilización, natural o artificial, al menos similar a la recomendada para los rellenos sanitarios que sirven a una población de hasta 100.000 habitantes. Similarmente, las distancias mínimas que deben existir entre el fondo de la zanja y el nivel superior de las napas subterráneas son las recomendadas para esta categoría de rellenos.

Al área designada donde se ubiquen las celdas de seguridad debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Tener un cerco perimetral de malla ciclón fija al suelo y altura de 2,0 m para evitar el acceso de personas no autorizadas y animales,

2. El cerco debe tener una puerta de acceso con dos hojas de 1.50 m. de ancho cada una, que permita el ingreso de los vehículos de transporte y la maquinaria.

3. Debe estar convenientemente señalizada advirtiendo la peligrosidad del sitio.

Para los efectos del cálculo de las dimensiones de las zanjas destinadas a la disposición de residuos especiales de establecimientos de atención de salud, si no se dispone de cifras obtenidas directamente de la medición hecha en los establecimientos a atender, se puede considerar una cantidad igual a 0,9 kg/cama/día, si los establecimientos de atención de salud hacen separación de residuos, y de 4,5 kg/cama/día si dicha separación no se practica. En el primer caso se estimará un peso específico de 0,9 kg/l y en el segundo caso un peso específico de 0,5 kg/l.

El recubrimiento de los residuos dispuestos en estas

Figura 3-31
Celda destinada a recibir REAS Relleno sanitario de Comayagua, Honduras.

Figura 3-32
Digestor biológico Relleno sanitario de Comayagua, Honduras

celdas debe ser inmediato a su descarga, para lo cual debe mantenerse permanentemente un acopio suficiente de material de cobertura a un costado de la zanja. Los residuos dispuestos en estas celdas no deben someterse a compactación.

Las condiciones de anaerobiosis imperantes al interior de la celda y la actividad microbiológica propia del suelo inviabilizan rápidamente los eventuales gérmenes patógenos que pudieran estar presentes en la masa de residuos depositados. Sin perjuicio de lo anterior, y a modo de incrementar el nivel de seguridad de la instalación, luego del acomodo y previo al cubrimiento con tierra, se esparcirá cal en forma de polvo sobre la superficie de los residuos. Cuando la cantidad de residuos depositados corresponda a un solo vehículo se pondrán aproximadamente 5 kg de cal, si se recibe más de un vehículo al día se agregará aproximadamente 3 kg de cal por vehículo ingresado.

Será responsabilidad del supervisor asignado por la Municipalidad vigilar la procedencia de los residuos que llegan al recinto, verificar estos no contengan residuos peligrosos y llevar una bitácora de registro de los residuos dispuestos en las celdas habilitadas para recibir residuos espéciales provenientes de los establecimientos de atención de salud.

3.7.1.2 Digestores biológicos

Una forma alternativa de dar adecuado tratamiento a los restos orgánicos provenientes de los establecimientos de atención de salud, consiste en

disponer estos residuos en un digestor biológico en donde se generan los mismos procesos anaeróbicos de estabilización que se producen al interior de una fosa séptica o de una celda sanitaria.

Existen diversos tipos y diseños de digestores biológicos para tratar restos orgánicos provenientes de establecimientos de atención de salud, sin embargo hay dos elementos comunes a todos ellos: cámara de digestión provista de tapa hermética y el tubo de ventilación protegido con rejilla. En algunos casos, la cámara de digestión es estanca y la biodigestión se produce sumergida total o parcialmente en medio líquido y en otros funciona como biodigestor seco ya que se posibilita la infiltración controlada través del terreno de los líquidos que se generan en los procesos de digestión anaeróbica.

Una versión mejorada de digestor biológico contempla una tolva de alimentación pivotada para el ingreso de los residuos, ubicada en el extremo superior de un ducto de alimentación de sección cuadrada o rectangular. Al abrir la tolva de alimentación automáticamente su superficie posterior obtura la parte superior del ducto de alimentación. Con esto, junto con facilitar la operación ingreso de los residuos se minimiza la salida de gases desde el interior durante el proceso de carga de residuos.

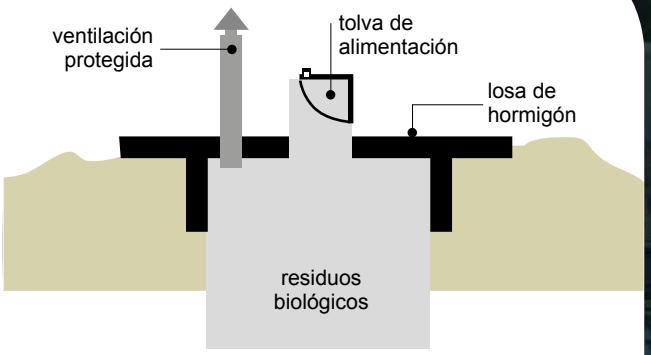


Figura 3-33
Digestor biológico con tolva de alimentación pivotada

Figura 3-34
Neumáticos a la espera de ser dispuestos en forma independiente de la celda sanitaria Relleno sanitario de Comayagua, Honduras.

3.7.2 Neumáticos

Los neumáticos usados representan un problema creciente desde el punto de vista sanitario ambiental, en particular en aquellas zonas en donde su abandono o disposición descuidada puede derivar en la creación de hábitats adecuados para la proliferación de mosquitos, muchos de ellos capaces de transmitir enfermedades de alta importancia en salud pública.

La disposición final de neumáticos enteros en rellenos sanitarios es desaconsejable debido al alto espacio que ellos ocupan y a que tienden a subir y emerger en la superficie de las celdas.

Existen experiencias de disposición final de neumáticos usados en terreno, pero en general ello se realiza en áreas o zanjas independientes del relleno sanitario destinado a los residuos sólidos domésticos. En estas áreas o zanjas especiales el cubrimiento de los neumáticos suele ser dificultoso y de alto costo, debido a la imposibilidad práctica de compactar los neumáticos, a menos que se introduzcan procesos previos de corte y/o molienda, y a la alta proporción de material de cobertura requerida. Por otra parte, dada la forma toroidal de los neumáticos, que deja importantes vacíos en su interior, usualmente el recubrimiento debe ser corregido y repasado periódicamente.

El reglamento contempla para la disposición final de las llantas y neumáticos su reutilización como material de relleno, fraccionándolos previo a su disposición final en celdas especiales para evitar la mezcla con otros residuos y cubriéndolos con material inerte para evitar

que se originen incendios. Lo anterior, sin perjuicio implementar otras alternativas de recuperación ambientalmente sustentables.

3.7.3 Lodos

Técnicamente, los lodos de plantas de tratamiento solo pueden ser recibidos en proporciones reducidas respecto de los residuos no especiales diariamente ingresados a un relleno y siempre que su contenido de humedad sea lo suficientemente bajo como para ser manejados por la maquinaria de compactación.

Los principales inconvenientes derivados del ingreso de lodos en grandes cantidades y/o sin previa deshidratación dicen relación con la pérdida de estabilidad estructural de las celdas sanitarias y su adherencia a la maquinaria de compactación, particularmente a la hoja de empuje y a las zapatas de las orugas o ruedas del tractor.

Lo anterior ha llevado a limitar en algunos casos el ingreso de lodos a rellenos sanitarios, aceptándose cantidades no superiores a un 6 a 8% del ingreso diario de residuos sólidos domésticos y contenidos de humedad en los lodos inferiores al 80%.

La reglamentación vigente establece que la disposición final de lodos de plantas de tratamiento, estanques, procesos industriales y desazolve de presas se debe llevar a cabo en celdas independientes de seguridad dentro del relleno sanitario, para evitar mezcla con otros residuos.

Capítulo 4

Habilitación y operación

4.1 Compactación de las celdas sanitarias

La forma en que se aborda la construcción de la celda sanitaria es de fundamental importancia, pues de ello dependerá, en gran medida, el grado de consolidación y estabilidad estructural que alcanzará el relleno, características que a su vez determinarán los posibles usos posteriores del sitio.

La compactación de los residuos es una operación clave que debe ser ejecutada con especial cuidado si se quiere obtener un relleno sanitario de alto nivel.

Los pasos a seguir para obtener resultados óptimos en la construcción de la celda sanitaria en un relleno sanitario mecanizado son los siguientes:

a) Distribuir los residuos en un frente de un ancho aproximadamente igual al ancho de la placa de empuje de la maquinaria utilizada conformando una capa de no más de 60 cm de espesor.

b) Crear un frente de trabajo con una pendiente de aproximadamente de 1:3 (altura:base), acomodando y compactando el material desde abajo hacia arriba.

c) Repetir esta operación 4 a 5 veces (4 a 5 pasadas) hasta eliminar los huecos y lograr que los residuos hayan sido compactados y su superficie no se deforme después del paso del equipo de compactación.

d) Repetir el ciclo anterior tantas veces como sea necesario hasta procesar todos los residuos ingresados en el día.

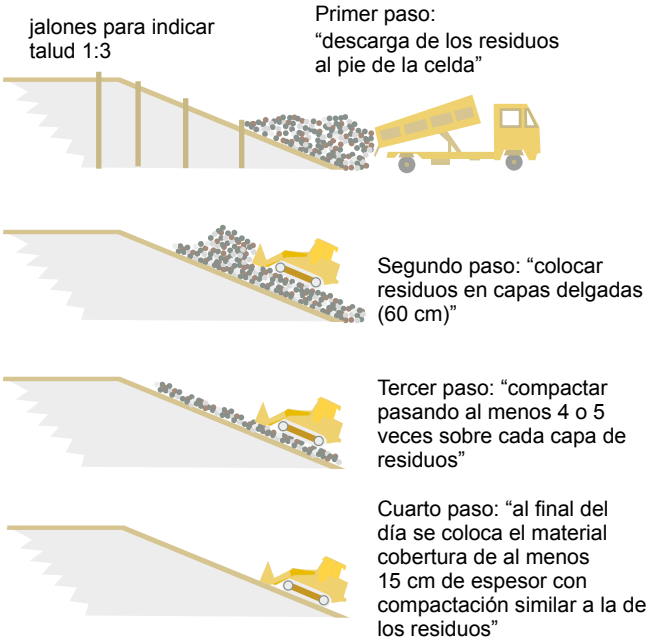


Figura 4-1
Secuencia de construcción de celdas

4.2 Cobertura de la celda sanitaria

Una vez compactada la basura, se procederá a ejecutar la capa de cobertura, cuyo espesor final compactado deberá ser el definido en el proyecto del relleno sanitario.

El material a emplear en la cobertura de las celdas debe ser homogéneo y tener un coeficiente de permeabilidad no superior a $1x10^{-4}$ cm/s, debiendo ser adecuadamente compactado para obtener en terreno una permeabilidad real lo más cercana posible a la óptima del material empleado. Dicho material deberá estar libre de piedras de tamaño importante, así como de ladrillos, escombros y basura, siendo aceptable hasta un 5% de piedras o guijarros mayores de 5 cm (2 pulgadas), y siempre que ninguna exceda de 10 cm (4 pulgadas). La permeabilidad del material de cobertura puede determinarse en un laboratorio de mecánica de suelos.

La tierra a utilizar deberá ser acumulada en una zona inmediata al borde del frente de trabajo en la parte superior de la celda en construcción, desde donde será distribuida sobre toda la superficie a cubrir, de acuerdo a los espesores indicados en el proyecto.

Una vez colocado el material de cobertura sobre la basura, éste deberá ser debidamente compactado de manera de obtener un grado de compactación cercano al óptimo. Tal compactación se efectuará pasando al menos 4 veces la maquinaria por cada punto de la cobertura.

La terminación de la celda, una vez puesto y compactado el material de cobertura, se hará de manera tal de dejar la superficie superior de ésta con una leve pendiente, del orden del 2% hacia su parte posterior. Dicha pendiente tiene por objeto reducir la posibilidad de afloramiento de lixiviado al momento de sobreponer una nueva celda.

Al término de la jornada diaria la totalidad de la celda debe quedar cubierta según lo señalado anteriormente y conforme a las especificaciones de proyecto en lo que respecta a espesores y pendientes laterales y superiores.

4.3 Manejo de lixiviados

4.3.1 Recirculación de lixiviados

La recirculación de lixiviados, en particular a través de celdas con un alto grado de estabilización, tiene como resultado una reducción de su carga contaminante, tanto orgánica como inorgánica. Los ácidos orgánicos presentes en los lixiviados reactivarán los procesos microbiológicos y serán utilizados como nutrientes por la flora bacteriana presente al interior del relleno; por su parte, el ambiente alcalino de las celdas tendrá por efecto la precipitación, y consiguiente retención, de metales. Paralelamente a lo anterior, y como parte del mismo proceso, se incrementará la actividad metanogénica y la generación de biogás, fenómeno que será necesario tener en cuenta al momento de decidir la recirculación.

La recirculación de lixiviados, requiere comprobar previamente que esta práctica no generará un deterioro en la estabilidad estructural de la instalación ni el afloramiento de líquidos en los taludes del relleno. En todo caso, la inyección de lixiviados se debe realizar a través de pozos especialmente construidos para tales efectos dispuestos de forma que permitan la distribución homogénea de los lixiviados en la masa de basuras. La inyección de lixiviados a través de las chimeneas de captación y drenaje de biogás no es aceptable, ya que con ello se interfiere, y a veces se interrumpe, la evacuación del biogás.

4.3.2 Tratamiento de lixiviados

En general el tratamiento de lixiviados es caro y complejo por lo que, antes de decidir la instalación de una planta de tratamiento, deben agotarse las opciones de diseño que apunten a la prevención y el manejo al interior del relleno. En caso de ser necesario, el tratamiento apropiado dependerá de las características del lixiviado. Las características más relevantes desde el punto de vista de su potencial contaminante son la demanda bioquímica de oxígeno, DBO, la demanda química de oxígeno, DQO, los

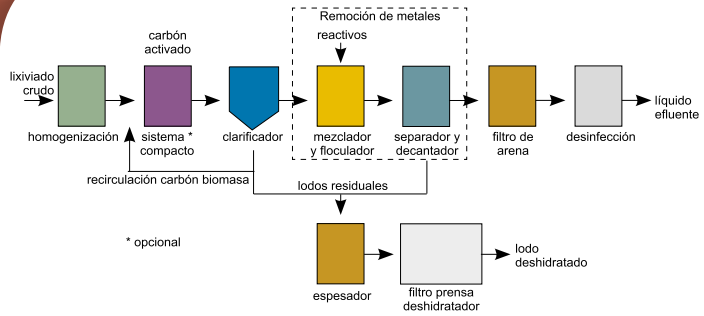


Figura 4-2
Esquema de un sistema de tratamiento fisicoquímico de lixiviados

Figura 4-3
Planta de tratamiento de lixiviados con tratamiento fisicoquímico y biológico

sólidos totales disueltos, STD, y los metales pesados.

Los lixiviados que presentan concentraciones muy altas de STD, -por sobre 50.000 mg/l-, pueden ser difíciles de tratar biológicamente. Si el tratamiento biológico es aplicable, dependerá del nivel de DBO característico del lixiviado en particular si resulta conveniente tratarlos mediante procesos aeróbicos o anaeróbicos. En todo caso, cuando ello es técnicamente procedente, es preferible emplear procesos de tratamiento anaeróbicos, dado que en general tienen un menor costo que los procesos de tratamiento aeróbicos, si bien, la presencia de sulfatos puede limitar o encarecer el uso de procesos de tratamiento anaeróbicos, debido a la producción de olores procedentes de la reducción biológica de los sulfatos a sulfuros. Por último, la toxicidad debida a la presencia de metales pesados también puede interferir el adecuado desarrollo de los procesos de tratamiento biológico.

El tratamiento físico-químico de los lixiviados también puede ser una alternativa si bien su eficiencia es baja en relación con la remoción de los compuestos orgánicos presentes. Los procesos de coagulación con sulfato de aluminio o con cloruro férrico a pH elevado, o la precipitación con cal o hidróxido de sodio, tienen buenos rendimientos en la remoción de color, turbiedad y metales, lo que facilita su manejo y disposición posterior, sin embargo, el tratamiento físico-químico de lixiviados consume cantidades importantes de reactivos y produce una gran cantidad de lodos que es necesario disponer.

En general, el tratamiento de los lixiviados es caro y requiere de instalaciones complejas cuya

operación hace necesario la presencia permanente de personal técnico altamente calificado, por lo que tanto el diseño como la operación del relleno deben apuntar, en primer término, a evitar la generación de lixiviados según lo señalado en los acápites anteriores referentes al balance hídrico y, en segundo término, al manejo de los lixiviados que aún así se produzcan con medidas tales como su confinamiento al interior del relleno, su almacenamiento en lagunas debidamente impermeabilizadas, su recirculación hacia las zonas más antiguas y estabilizadas del relleno o el riego de superficies terminadas del relleno.

4.4 Manejo de biogás

Las chimeneas de tipo drenes de gavión o de tambor se empiezan a construir desde la base del relleno y se continua agregando módulos hasta llegar a la cota final donde se finalizan poniendo un sello de 1 m de arcilla, un manto de HDPE de forma circular y un tubo de salida del biogás.

El biogás extraído desde el interior del relleno, ya sea pasivamente o mediante extracción forzada, debe ser manejado adecuadamente para evitar explosiones o incendios. A igual temperatura, el biogás es levemente más pesado que el aire, por lo que tiende a acumularse en zonas bajas en especial en condiciones de estabilidad atmosférica. Al mezclarse con el aire en proporciones del orden de 10% al 20% puede formar

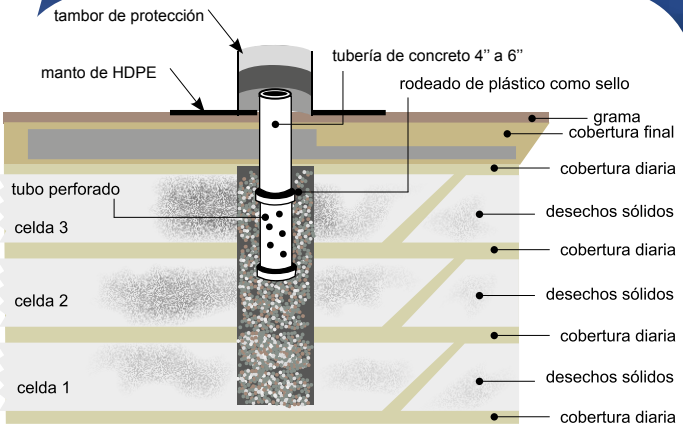


Figura 4-4
Chimenea con tambor de protección (en corte) para proteger la llama de combustión

Figura 4-5
Extractores y antorcha con lugar para tomar muestra de gases efluentes

una mezcla explosiva que en presencia de alguna fuente de energía de activación puede explosionar violentamente.

Si no es utilizado como fuente de energía, el biogás extraído del relleno debe ser quemado para evitar su dispersión incontrolada y prevenir la eventual formación de bolsones de mezcla explosiva. Para estos efectos, en el caso de extracción pasiva, una vez finalizadas las chimeneas y provistas del tubo para la salida del biogás, estas deben ser encendidas tan pronto comienza la producción estable de biogás. Las chimeneas encendidas deben protegerse del viento para evitar éste las apague. Una forma muy utilizada para conseguir esta protección consiste en poner en torno a la chimenea un tambor metálico al cual se le hayan retirado ambas bases.

En el caso de extracción forzada, el biogás de las diferentes chimeneas, si no es aprovechado como fuente de energía, se conduce mediante tuberías hasta una antorcha en donde se quema controladamente.

4.5 Circulación al interior del relleno

La operación del relleno sanitario debe incluir un programa de habilitación de caminos internos el que deberá ser establecido de acuerdo al avance de las obras del relleno, estos caminos deberán tener la calidad suficiente para garantizar la seguridad de los vehículos que transportan residuos.

Los caminos internos deben ser habilitados de acuerdo al flujo de vehículos estimado en el relleno sanitario. Deben estar provistos de toda la señalización necesaria para evitar accidentes y guiar a los vehículos en su recorrido en el interior de la instalación. Al igual que el camino de acceso al relleno sanitario, los caminos internos de circulación, deben mantenerse en lo posible transitables en toda época del año.

La circulación de vehículos y maquinaria al interior del relleno es particularmente intensa durante algunas horas del día, la que se verifica normalmente por caminos de tierra que conducen al frente de trabajo. Lo anterior hace necesario asegurar que los caminos de tierra permanezcan húmedos con el fin de evitar la suspensión de polvo y material particulado. Con frecuencia, en las épocas del año de baja precipitación o estación seca, es necesario regar periódicamente los caminos internos del relleno mediante camiones aljibe provistos de un tubo horizontal perforado. La frecuencia con que se deban regar los caminos estará determinada por las condiciones climáticas locales.

Figura 4-6
Caminos internos para el ingreso y salida de vehículos que transportan residuos y material de recubrimiento

4.6 Rejas de interceptación de materiales livianos

En zonas donde se presentan vientos intensos, con frecuencia se produce el arrastre de materiales livianos tales como papeles y plásticos al momento de la descarga de los residuos en el frente de trabajo

o durante su acomodo y compactación. Una forma de evitar la diseminación de materiales livianos por acción del viento es colocar barreas desplazables de malla de alambre. Estas barreras consisten en bastidores metálicos provistos de malla de alambre montados sobre una base también metálica para darles estabilidad. Estas barreras se van desplazando a medida que avanza el frente de trabajo y su función es dejar pasar el viento y retener en su reticulado los materiales arrastrados por éste. Los bastidores usuales tienen entre 1,8 m y 2 m de alto y un largo de 4 m a 5 m.

4.7 Control del ingreso de residuos

El registro de la cantidad de residuos ingresada diariamente al relleno y de la cantidad ingresada por cada vehículo recolector es de fundamental importancia no solo para los efectos de conocer la cantidad de residuos que ingresa al relleno y programar faenas o facturar servicios, sino también para optimizar la eficiencia con que se utilizan los camiones recolectores.

4.8 Vigilancia

En todo relleno sanitario es conveniente mantener un sistema de vigilancia permanente para evitar el ingreso de personas ajenas a la obra y alertar ante cualquier anormalidad observada al interior del recinto.

4.9 Selección de maquinaria

Los costos más importantes en la actividad diaria de un relleno sanitario provienen de la operación y mantenimiento del equipo móvil empleado para esparcir, compactar y recubrir los residuos sólidos que llegan a este tipo de obras. Estos mismos equipos son también fundamentales en las etapas de habilitación y cierre de los rellenos. En los grandes rellenos muchas veces las tres etapas; habilitación, operación y cierre se desarrollan en forma simultánea en diferentes sectores.

Las características, capacidad y cantidad del equipo utilizado estarán en directa relación con el tamaño del relleno sanitario, los residuos que recibe, el método de operación empleado y el tipo de terreno. Si se tiene equipo de características inadecuadas, tamaño insuficiente o mal operado, se producirán interrupciones del trabajo debido a averías, mayores

costos del trabajo realizado y una operación inadecuada del relleno, incidiendo directamente en problemas sanitarios y ambientales.

Los equipos del relleno sanitario desarrollan tres actividades principales: las excavaciones y movimientos de tierras necesarios en las tres etapas del relleno, el acomodo, compactación y recubrimiento de los residuos sólidos en el frente de trabajo y los afinamientos de superficie para dejarlas compactadas y con las pendientes apropiadas para evitar problemas de erosión con las aguas lluvias.

Los equipos más utilizados en los rellenos sanitarios son:

- de compactación
  - tractores de orugas con placa empujadora (bulldozer)
  - máquinas compactadoras con ruedas dentadas de acero y placa empujadora,
- de excavación
  - la excavadora de oruga
- de carguío
  - cargador de oruga
- de transporte
  - camiones tolva de transporte de tierra de excavación y de material de recubrimiento

Como equipos de apoyo los más empleados son: las motoniveladoras, los cargadores de arrastre, los camiones cisternas, las compactadoras de suelo o apisonadores y los camiones con equipos compresores.

A continuación se presentan las características más importantes de los equipos más empleados para la operación de un relleno sanitario de residuos sólidos no especiales.

4.9.1 Tractores de orugas

El tractor de orugas es probablemente el equipo más utilizado y a la vez el más versátil en un relleno sanitario. Esta máquina no sólo esparce y compacta la basura y el material de recubrimiento, sino que también prepara el sitio, extrae el material de cobertura, construye caminos de transporte interno, saca árboles y tocones y trabaja prácticamente en cualquier condición climática. El tractor de orugas es una máquina apropiada para todo tipo de relleno sanitario.

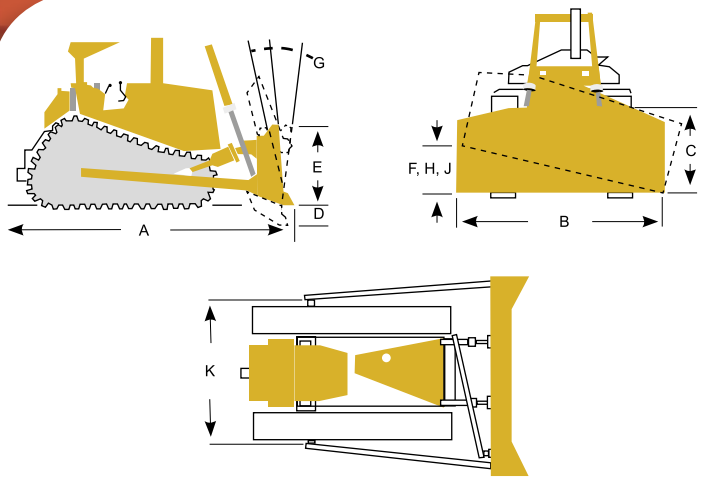
Con el tractor de orugas se puede alcanzar densidades de compactación de 600 a 750 kg/m^3. Se logra la máxima compactación cuando se trabaja en una pendiente de 1:3, lo que permite que las placas metálicas de la oruga desgarren y rompan los residuos mientras los empujan y compactan cuesta arriba. El límite económico de desplazamiento de material de cobertura o de residuos para un tractor de orugas es normalmente menor de 90 m siendo preferible no exceder los 40 m.

Figura 4-7
Tractor de orugas acomodando residuos

La hoja empujadora de los tractores orugas de rellenos sanitarios tiene características apropiadas para este tipo de trabajo. Se puede aumentar la altura de la hoja poniendo una rejilla en la parte superior lo que le permite desplazar más residuos, tener una buena visibilidad y proteger el radiador.

Si se tiene una hoja con inclinación hidráulica esta permitirá perfilar el material de cobertura del terreno con el fin de dar pendientes apropiadas para sacar el agua lluvia que cae directamente en la parte alta de la obra evitando que se produzcan erosiones o empozamientos de aguas y su infiltración excesiva.

Las siguientes figuras indican los componentes típicos de un tractor de orugas.



A: Largo hoja

B: Ancho (con cantoneras estándar)

C: Altura

D: Profundidad Máxima de Excavación

E: Despejo sobre el suelo levantada completamente

F: Inclinación manual Máxima

G: Ajuste Máximo del ángulo de Ataque

H: Inclinación Hidráulica Máxima

J: Inclinación Hidráulica Máxima (tirante manual centrado)

K: Ancho del muñón de los brazos de empuje (al centro del muñón).

Figura 4-8
Representación esquemática de tractor de orugas y sus componentes

4.9.2 Compactador con rueda dentada de acero

Los compactadores con rueda dentada de acero son máquinas altamente especializadas que resultan eficaces para esparcir y compactar grandes volúmenes de residuos. Los compactadores ofrecen mayores velocidades de operación que los tractores de orugas. Estas máquinas logran mayores niveles de compactación, alcanzando densidades del orden de los 750 a 850 kg/m^3.

Normalmente, los compactadores con rueda dentada de acero operan en pendiente de 1:4 o 1:3 debido a consideraciones de seguridad de trabajo. No se deben utilizar estos compactadores para excavar material de cobertura.

Cuando los residuos tienen un alto contenido de materia orgánica, -más de un 45% en peso-, y más de un 50% de humedad medida con respecto a una base húmeda, se producirá una gran cantidad de líquidos debido a la alta tasa de compactación que se alcanza con de estas máquinas los que escurrirán hasta la base generando pozas al pie del talud del frente de trabajo. Esta situación hace que la descarga de los vehículos se realice por la parte superior de la celda en construcción para evitar que los camiones se entierren por el reblandecimiento del material de cobertura.

La alta compactación lograda por estas máquinas permite hacer excavaciones profundas en el relleno sin que se produzcan desmoronamientos de las paredes, pero por otra parte generan un medio muy

Figura 4-9
Compactadores con rueda de acero dentada

Figura 4-10
Cargador de orugas trabajando en relleno sanitario

poco permeable que dificulta la salida del lixiviado y el biogás.

4.9.3 Cargadores de orugas

Los cargadores de orugas son muy versátiles, lo que les permite trabajar en muchas aplicaciones. En rellenos que reciben menos de 150 toneladas por día, los que por lo general utilizan una cantidad mínima de equipos, los cargadores de orugas pueden realizar las funciones de manejo de residuos y de material de cobertura.

El cargador de oruga es una máquina ideal para trabajar en un relleno que utiliza el método de trinchera o zanja. Como el cucharón no se extiende más allá de las orugas, se puede obtener compactación completa hasta el borde de las paredes de la zanja. Las densidades de compactación son comparables a las alcanzadas con el tractor de orugas (bulldozer) y se encuentran en el rango de 480 a 580 kg/m^3.

4.9.4 Cargadores de rueda

Si bien no se recomiendan como máquina para manejo de materiales y compactación, los cargadores de rueda son utilizados por aquellas comunidades que comparten una sola máquina y que viajan de un relleno a otro. La versatilidad y la movilidad son las principales ventajas del cargador de ruedas. En rellenos de más

300 ton/día los cargadores de rueda se pueden usar a veces para trabajos generales de limpieza y para cargar el material de recubrimiento. Los cargadores de ruedas también son unidades populares en zonas de transferencia para cargar y separar la basura. Se debe considerar el uso de neumáticos especiales llenos de espuma de goma a causa del constante peligro de pinchazos. Sin embargo, los neumáticos rellenos de espuma tendrán capacidades menores de toneladas-km por hora.

Los cargadores de rueda pueden lograr densidades de compactación de 500 a 650 Kg/m^3. Una desventaja de los cargadores de ruedas es que se hunden en la basura dejando surcos, lo que requiere más material de cobertura.

Figura 4-11
Cargador de rueda

4.9.5 Excavadoras

Las excavadoras son equipos que se utilizan en una amplia variedad de trabajos en los rellenos sanitarios, donde el material a excavar se encuentra bajo el nivel del piso en el que se apoya la máquina. Las excavadoras se utilizan principalmente para obtener el material de recubrimiento, excavar zanjas de interceptación de aguas lluvias, realizar alvéolos destinados a contener residuos (lodos, cenizas, residuos especiales, etc.), construir lagunas de lixiviados o líquidos percolados, excavar zanjas para disponer residuos sólidos, etc.

Figura 4-12
Retroexcavadora con hoja de empuje

Figura 4-13
Excavadora realizando zanja para relleno sanitario

Figura 4-14
Excavadora cargando camión con material de recubrimiento

4.9.6 Compactadores de suelos

Los compactadores son equipos que permiten elevar la densidad del suelo con el fin de mejorarlo estructuralmente y acondicionarlo para resistir los fenómenos meteorológicos, tales como el viento y la lluvia.

Figura 4-15
Compactadores de tambores de acero liso

4.10 Estimación de requerimientos de maquinaria para la construcción de las celdas en un relleno sanitario mecanizado

En el cuadro de la siguiente página se presentan cifras que orientan la selección de equipos, de acuerdo a la cantidad diaria de residuos que debe manejar un relleno sanitario.

Figura 4-16
Compactador de neumáticos múltiples

Figura 4-17
Compactador de pata de cabra o pisones estático

TONELADAS POR DÍA RELLENO SANITARIO	MAQUINARIA REQUERIDA	CARACTERÍSTICA MAQUINARIA
0-50	BULLDOZER D3	70 hp. 7.050 kg. Ancho zapata 40.6 cm. Largo de cadena en el suelo 190 cm
0-50	CARGADOR DE ORUGA 933	70 hp 8.050 kg. Ancho de zapata 35,6 cm. Largo de cadena en el suelo 190 cm
50 – 140	BULLDOZER D4	80 hp. 7.300 kg. Ancho de zapata 40,6 cm. Largo de cadena en el suelo 205 cm.
50 – 140	COMPACTADOR DE RELLENO 816	216 hp. 20.600 kg.
50 – 140	CARGADOR DE ORUGA 939	90 hp. 9.800 kg. Ancho de zapata 40,6 cm. Largo de cadena en el suelo 214 cm.
140 – 220	BULLDOZER D6D	140 hp. 14.650 kg. Ancho de zapata 50,8 cm. Largo de cadena en el suelo 236,3 cm.

TONELADAS POR DÍA RELLENO SANITARIO	MAQUINARIA REQUERIDA	CARACTERÍSTICA MAQUINARIA
140 – 220	COMPACTADOR DE RELLENO 816	216 hp. 20.600 kg.
140 – 220	CARGADOR DE ORUGA 953	120 hp. 14.460 kg. Ancho de zapata 38 cm. Largo de cadena en el suelo 229,5 cm.
220 – 320	BULLDOZER D6D	140 hp. 14.650 kg. Ancho de zapata 50,8 cm. Largo de cadena en el suelo 236,3 cm.
220 – 320	COMPACTADOR DE RELLENO 816	216 hp. 20.600 kg.
220 – 320	CARGADOR DE ORUGA 963	160 hp. 19.300 kg. Ancho de zapata 45 cm. Largo de cadena en el suelo 245,4 cm.
320 – 450	BULLDOZER D7G	200 hp. 20.094 kg. Ancho de zapata 50,8 cm. Largo de cadena en el suelo 271,8 cm.

TONELADAS POR DÍA RELLENO SANITARIO	MAQUINARIA REQUERIDA	CARACTERÍSTICA MAQUINARIA
320 – 450	COMPACTADOR DE RELLENO 816	216 hp. 20.600 kg
320 – 450	CARGADOR DE ORUGA 973	210 hp. 24.680 kg. Ancho de zapata 50 cm. Largo de cadena en el suelo 291,7 cm.
450 – 680	BULLDOZER D8N	285 hp. 36.840 kg. Ancho de zapata 56 cm. Largo de cadena en el suelo 321 cm.
450 – 680	COMPACTADOR DE RELLENO 826	315 hp. 31.630 kg.
680 y más	BULLDOZER D9	47.420 kg. Ancho de zapata 61 cm. Largo de cadena en el suelo 347cm.
680 y más	COMPACTADOR DE RELLENO 836	450 hp. 45.400 kg.
680 y más	Otros equipos de apoyo según se requieran	

A continuación se entrega un procedimiento alternativo al uso de las cifras entregadas en el cuadro anterior para calcular el tamaño (potencia) y cantidad de maquinaria (tractores de orugas) requerida para compactar y cubrir la celda en un relleno y que permite considerar como variables de cálculo la cantidad de residuos y de tierra a manejar diariamente, (cifras obtenidas del diseño de la celda tipo), y considerar en forma separada la duración de la jornada de trabajo:

$$N = \frac{1}{J}\left(\frac{R}{R_T} + \frac{T}{R_t}\right)$$

En donde:

N = cantidad de maquinaria necesaria para compactar y cubrir las celdas
J = duración de la jornada diaria de trabajo (en horas)
R = volumen de residuos a compactar diariamente en el relleno (en m^3)
T = volumen de tierra necesaria para cubrir los residuos compactados (en m^3)
Rr = rendimiento de la maquinaria en el manejo de los residuos (en m^3/hr)
Rt = rendimiento de la maquinaria en el manejo de tierra (en m^3/hr)

Potencia del tractor de orugas (Horse Power)	Rendimiento (m^3/hr)	
	Residuos	Tierra
75 HP	37	22
140 HP	40	34
200 HP	52	43
300 HP	61	61

El procedimiento de cálculo anterior permite determinar la combinación más conveniente de tractores de orugas para operar eficientemente un relleno sanitario. En todo caso un aspecto básico a considerar al seleccionar la maquinaria necesaria para operar un relleno sanitario dice relación con la disponibilidad local del equipo, la existencia de repuestos, el acceso a servicios de mantenimiento, la factibilidad de remplazo oportuno en caso de falla grave de la maquinaria y la disponibilidad de maquinaria adicional en caso de ser necesario ampliar la faena.

Utilizando los datos del ejemplo dado en acápite 3.1, a continuación se calcula la maquinaria necesaria para acomodar, compactar y cubrir los residuos de la celda sanitaria tipo diseñada:

- Residuos ingresados diariamente al relleno: 600 ton/día
- Densidad de los residuos descargados del camión recolector: 0,47 ton/m^3
- Material de recubrimiento necesario para cubrir la celda: 144,8 m^3
- Jornada laboral: 8 hrs/día

Volumen de residuos a compactar:

$$V = \frac{600 \text{ ton/día}}{0{,}47 \text{ ton/m}^3} = 1.277 \text{ m}^3$$

Maquinaria (tractores de orugas) necesaria:

i) Tractor de orugas de 75 HP

$$N = \frac{1}{8 \text{ hrs.}} \left(\frac{1.277 \text{ m}^3}{37 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}} + \frac{144{,}8 \text{ m}^3}{22 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}} \right) = 5{,}1 \Rightarrow 6$$

ii) Tractor de orugas de 140 HP

$$N = \frac{1}{8 \text{ hrs.}} \left(\frac{1.277 \text{ m}^3}{40 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}} + \frac{144{,}8 \text{ m}^3}{34 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}} \right) = 4{,}5 \Rightarrow 5$$

iii) Tractor de orugas de 200 HP

$$N = \frac{1}{8\ \text{hrs.}} \left(\frac{1.277\ m^3}{52\ \frac{m^3}{hr}} + \frac{144{,}8\ m^3}{43\ \frac{m^3}{hr}} \right) = 3{,}5 \Rightarrow 4$$

iv) Tractor de orugas de 300 HP

$$N = \frac{1}{8\ \text{hrs.}} \left(\frac{1.277\ m^3}{61\ \frac{m^3}{hr}} + \frac{144{,}8\ m^3}{61\ \frac{m^3}{hr}} \right) = 2{,}91 \Rightarrow 3$$

El resultado del cálculo siempre deberá aproximarse por exceso, pues al término de la jornada diaria todos los residuos deben quedar cubiertos. Luego, el relleno podía operar al inicio de su vida útil con 3 tractores de orugas de 300 HP.

Figura 4-18
Herramientas utilizadas para la operación de un relleno sanitario manual

4.11 Equipo y herramientas utilizados en rellenos sanitarios manuales

Las herramientas utilizadas en la operación de un relleno sanitario manual corresponden a las comúnmente empleadas en labores agrícolas y/o en algunas faenas de la construcción. Las operaciones a realizar durante la operación diaria corresponden al esparcimiento, acomodo y compactación de los residuos, acarreo y colocación de la tierra de cobertura y compactación final de la celda diaria. Las herramientas utilizadas para estas labores son rastrillo, pala, carretilla, picota, chuzo y pisón.

4.12 Plan de operaciones

El Plan de operaciones consiste en una descripción detallada de todas las operaciones y actividades necesarias para dar disposición final sanitariamente adecuada a los residuos sólidos de acuerdo a lo definido en el proyecto del relleno, incluyendo la etapa de habilitación. En el Plan de operaciones se detallan

las obras y equipamientos mínimos que deben estar presentes en el sitio para el inicio de la disposición de los residuos conforme a lo señalado en los acápites relativos a diseño de la celda sanitaria tipo, impermeabilización de fondo y lateral, compactación de las celdas sanitarias, cobertura de la celda sanitaria, manejo de lixiviados, manejo de biogás, selección de maquinaria, obras anexas y prácticas para mitigar efectos adversos.

El Plan de operaciones deberá definir además el programa de avance de las obras y establecer cronológicamente las etapas de desarrollo del proyecto. Este programa comienza con el replanteo en terreno del área donde se comenzará a rellenar y el desarrollo de cada una de las tareas a ser ejecutadas, especificando el personal responsable de cada una de ellas así como los equipos a emplear en cada una de las faenas. El Plan de operaciones debe además definir con claridad las funciones y responsabilidades de cada una de las personas que laboran en el relleno

El plan de operación debe abordar además de lo arriba señalado, los siguientes aspectos:

- Definición de responsabilidades y competencias
- Horario de funcionamiento del relleno
- Definición de los tipos de desechos que se acepta y de las áreas donde deben ser depositados
- Procedimientos para la descarga y manejo interno de los desechos en el sitio
- Procedimientos operativos y normas de higiene y seguridad laboral

- Medidas de control de emisiones y de protección y mitigación de daños sanitarios y ambientales
- Prácticas de inspección y control interno de las obras y faenas.

4.13 Recursos humanos

El personal necesario para la operación de un relleno sanitario dependerá del tamaño y de la complejidad de cada obra en particular, por lo que solo es posible entregar algunas definiciones respecto de sus características y calificación según el tipo faenas previstas e importancia de la obra:

- Jefe del relleno (ingeniero civil, constructor civil)
- Ayudante del jefe del relleno (ingeniero de ejecución o técnico)
- Responsable del control, registro y pesaje de camiones
- Supervisor encargado de ordenar la descarga a los recolectores
- Chofer(es) de tractor compactador
- Chofer(es) de camión u otra maquinaria prevista dentro del relleno

- Maestro o técnico para reparaciones de vehículos
- Operarios para reparaciones y mantención de vehículos
- Operario(s) de relleno con las tareas siguientes:
  - construcción de chimeneas
  - limpieza de canales de drenaje y cunetas
  - Mantenimiento de las lagunas de lixiviados
- Guardia(s) con tareas siguientes:
  - Presencia continua sobre el relleno
  - Control del ingreso de personas no autorizadas
  - Control del ingreso de animales

Capítulo 5

Plan de cierre

5.1 Objetivo del Plan de cierre

Al término de la vida útil de un relleno sanitario corresponde proceder a su cierre. El cierre constituye el último paso para convertir un el relleno sanitario en un sistema controlable a largo plazo, y eventualmente, en un sitio aprovechable con fines recreacionales, deportivos o estéticos. Para estos efectos el proyecto del relleno debe contener un Plan de Cierre cuyo objetivo fundamental es definir y diseñar la forma en que se abordarán cuatro cuestiones básicas: cómo se controlarán las emisiones de gases y vapores de sustancias volátiles residuales, cómo se mantendrá bajo control la infiltración de lixiviados residuales hacia el subsuelo circundante, de qué manera se restaurará desde el punto de vista ambiental y paisajístico el lugar y qué usos posteriores se le dará al sitio.

La importancia de incorporar el Plan de Cierre al proyecto original, radica en que las obras de cierre y los usos posteriores del sitio en que ha funcionado un relleno no son independientes de la forma en que el relleno ha sido diseñado y ha operado y en consecuencia, tanto el diseño como la operación y el cierre deben concebirse desde un inicio en forma coherente. Por otra parte, no es poco frecuente que el Plan de Cierre comience a ejecutarse en forma paralela a la operación en zonas del relleno donde ya se han alcanzado las cotas finales de rellenamiento, se ha estabilizado la mayor parte de los residuos y se han producido los principales asentamientos esperados.

El Plan de Cierre debe definir la cobertura final y el sistema de interceptación perimetral de escorrentías superficiales, el manejo de lixiviados y biogás, la operación y mantención de los sistemas de monitoreo y control y el uso o destino futuro del terreno incluidas las obras y actividades que se proyecta realizar.

5.2 Sello superficial

Una vez concluida la operación del relleno se deberá colocar un sello superficial sobre su superficie con el fin de minimizar la infiltración de precipitaciones y evitar la salida no controlada de biogás. Como ya se ha señalado más arriba, la colocación de este sello superficial puede comenzar mientras el relleno está aún en operación, en especial en rellenos de gran tamaño. En todo caso deberá ser parte del diseño del Plan de Cierre el asegurar la continuidad y completitud del sello superficial final.

El sello superficial debe tener un espesor de al menos 60 centímetros y una conductividad hidráulica inferior o igual $1x10^{-5}$ cm/s. Finalmente se debe incluir una protección contra la erosión que deberá consistir en una capa de suelo de al menos 15 cm de espesor, la que debe ser capaz de sostener vegetación propia de la zona.

La topografía final del relleno una vez colocado el sello superficial dependerá del tipo de relleno en particular, si bien la superficie final debe ser emparejada de forma de eliminar depresiones u oquedades que posibiliten el apozamiento de las aguas de precipitación y nivelada de manera de dar pendientes finales que faciliten su escurrimiento hasta fuera de los límites del relleno. En el caso de rellenos de trinchera y de rellenos en depresiones el sello superficial usualmente se diseña y construye dando continuidad al nivel de las áreas circundantes. En el caso de rellenos de áreas planas o llanuras o de rellenos en laderas de cerros o en quebradas el acabado final del sello superficial dependerá de la configuración que haya contemplado cada proyecto específico.

5.3 Usos posteriores del sitio

Luego del cierre de la instalación, el área rellenada no se considera apta para construir edificios para uso habitacional ni de servicios. Si bien prácticamente el 90% del asentamiento total esperado en un relleno se produce entre el primer y segundo año después de depositados los residuos, el área rellenada seguirá sufriendo asentamientos diferenciales menores por tiempos prolongados y la resistencia estructural del sitio permanecerá pobre. No obstante lo anterior, dependiendo de las características del terreno y de la etapa en que se encuentre la actividad metanogénica residual, una vez efectuado el cierre del relleno el sitio podrá dedicarse a áreas verdes, espacios de esparcimiento, canchas deportivas o actividades agrícolas.

El plazo en que puedan habilitarse los usos previstos y permitirse el acceso de la población al área ocupada por el relleno, luego de colocado el sello superficial, dependerá del tipo de relleno, del uso previsto y del sistema de vigilancia que se haya implementado. En todo caso, el acceso de la población solo procede una vez que en las áreas de acceso se haya efectuado el sellado de las chimeneas de evacuación de gases que se menciona en el acápite 5.3.

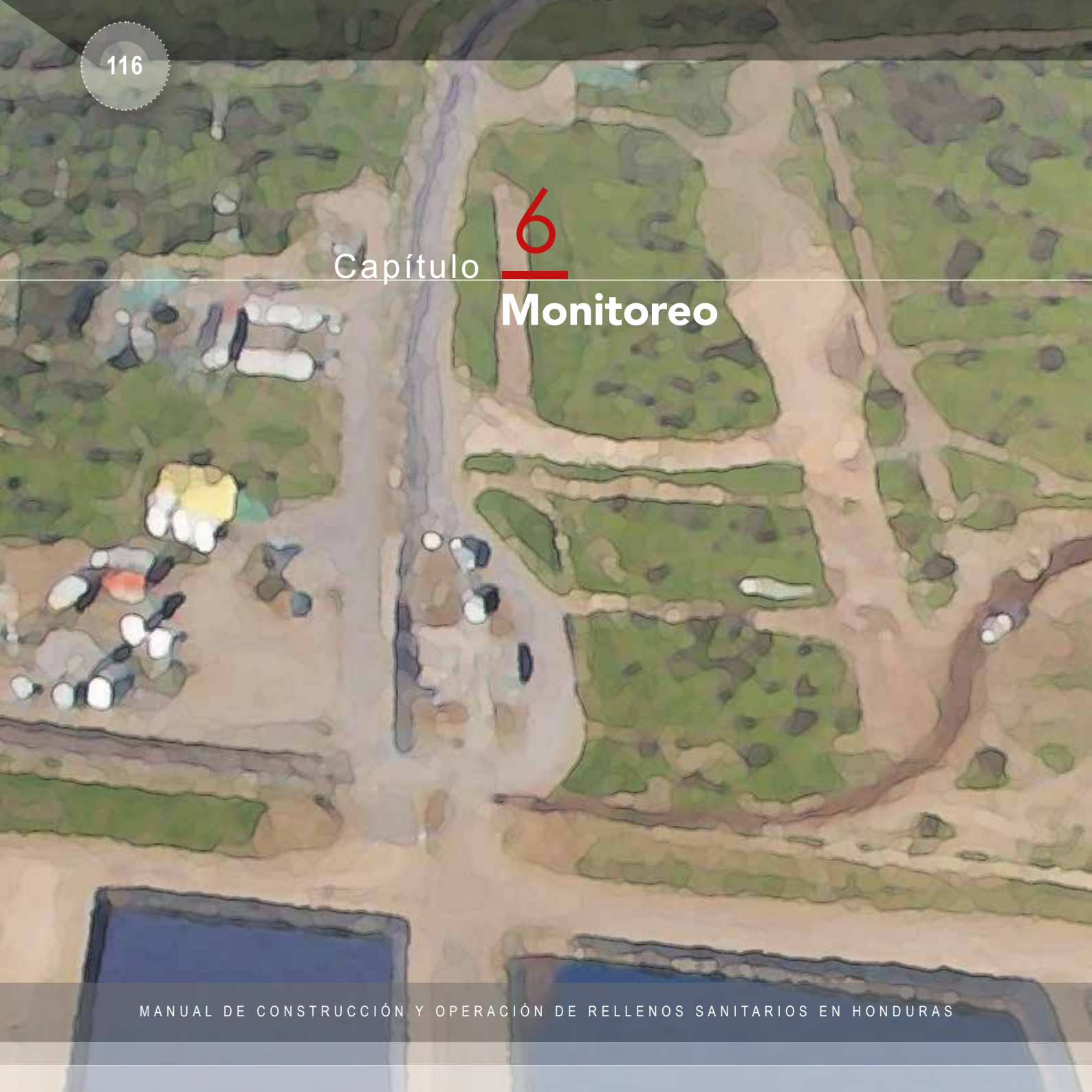
5.4 Vigilancia y control

Dado que la actividad metanogénica, aunque en tono menor y decreciente, puede prolongarse durante años con posterioridad al cierre del relleno el recinto deberá mantenerse debidamente vigilado y bajo control.

Cuando la concentración de metano sea baja e intermitente se podrá proceder al sellado de las chimeneas y a su posterior apertura periódica con el fin de evacuar el biogás residual formado al interior del relleno. Esta práctica evitará la formación de zonas internas de presión suficiente como para inducir la migración incontrolada de biogás.

La generación residual de biogás no impide el uso del sitio para los fines antes señalados, pero deberá vigilarse que los pozos de extracción de biogás ya sellados no sean abiertos ya sea en forma casual o intencional por los usuarios y, por otra parte, deberá asegurarse su mantención.

Asimismo, deberá mantenerse vigilancia sobre los pozos de monitoreo de aguas subterráneas que se encuentran dentro del recito y asegurarse que estos no sean intervenidos o dañados ni que se introduzcan en su interior sustancias o materiales que puedan alterar la calidad de las aguas en su interior.



Capítulo 6

Monitoreo

6.1 Monitoreo de aguas durante la operación

Si bien el proyecto de un relleno sanitario contempla medidas preventivas destinadas a minimizar la formación de lixiviados y a evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, siempre será necesario disponer de un sistema de monitoreo que permita verificar en forma objetiva que dichas medidas han sido eficaces y suficientes y, en caso contrario, que permita adoptar las acciones correctivas que se estimen necesarias.

Para efectos de lo anterior se debe disponer de un conjunto de pozos de monitoreo que permitan conocer la calidad de las aguas subterráneas y cualquier variación de dicha calidad que pueda ser atribuible al relleno sanitario.

Dependiendo del tamaño del relleno se deberá disponer de al menos un pozo de monitoreo aguas arriba del área ocupada por el relleno en relación a la dirección del escurrimiento de las aguas subterráneas y dos pozos aguas abajo del área ocupada por el relleno. Las autoridades ambientales competentes podrán eximir de esta obligación a aquellos rellenos que atiendan a menos de 100.000 habitantes cuando la profundidad de las aguas subterráneas y las características del terreno así lo aconsejen.

Para rellenos de superficie mayor a 15 hectáreas se recomienda agregar 1 pozo de monitoreo por cada 5 hectáreas adicionales de relleno, cuidando que la distribución de los pozos tienda a ser perimetral aguas abajo del área del relleno y que éstos estén en relación de 1:2 a 1:3 respecto de los pozos ubicados aguas arriba del área ocupada por el relleno.

La ubicación y profundidad de los pozos de monitoreo deberá determinarse en base a estudios técnicos específicos sobre el sitio, que provean una

adecuada caracterización del acuífero, caudal y variaciones estacionales del flujo.

Se debe hacer al menos un análisis de la calidad del agua en cada pozo de monitoreo antes de comenzar a operar, de forma de tener conocimiento de la calidad original del agua. Los parámetros a analizar deben incluir los señalados en la tabla de Valores de referencia de composición de lixiviados/percolados consignada en el acápite 3.4.2. Una vez que el relleno comienza a operar los análisis deben repetirse al menos una vez por año, si es que no se dispone de información que aconseje repetirlos con mayor frecuencia.

Adicionalmente a lo anterior, deben analizarse al menos cada 2 meses en los pozos aguas abajo del área del relleno las concentraciones de cloruro y la DQO, ya que estos parámetros son característicos de la contaminación por líquidos percolados filtrados a través del suelo. De constatarse una variación brusca significativa de la concentración de cloruros y DQO, se deberá realizar un análisis completo según lo señalado en el párrafo anterior y, de verificarse una contaminación de la napa por filtración de líquidos percolados, deberán iniciarse los estudios de terreno para determinar su causa y la forma de corregirla.

6.2 Monitoreo de gases durante la operación

Durante la operación del relleno debe monitorearse la presencia de gas metano a la salida de las chimeneas de extracción de gases cuando estás se apagan y la presencia de mezcla explosiva en las zona bajas del relleno y en sus instalaciones conexas. Para estos efectos de debe disponer en terreno de un metanómetro y un explosímetro. Existen equipos de terreno capaces de determinar ambos parámetros.

La medición de la presencia de mezcla explosiva en zonas bajas y en recintos de las instalaciones del relleno debe hacerse diariamente, en especial en horas tempranas de la mañana o en las horas de mayor estabilidad atmosférica.

En caso de preverse la extracción forzada de biogás será imprescindible además disponer de un sistema de medición de la concentración de oxígeno en el gas extraído de forma de regular la extracción a tasas que no impliquen el riesgo de introducción de aire atmosférico al interior del relleno y prevenir así la ocurrencia de incendios y/o explosiones por formación de mezcla explosiva al interior del relleno.

Si el relleno se ubica en zonas cercanas a áreas en las cuales existen tuberías de alcantarillado o ductos subterráneos de tendidos eléctricos, estos deben ser monitoreados periódicamente con una frecuencia al

menos semanal con el fin de verificar que no haya introducción de gas metano en su interior debido a posibles migraciones laterales de biogás.

6.3 Monitoreo de aguas posterior al cierre

El monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas deberá realizarse anualmente una vez efectuado el cierre del relleno y mantenerse por un lapso de al menos 10 años. Este monitoreo deberá incluir al menos la determinación de cloruros de la DQO. Al igual que en el caso del monitoreo efectuado durante la operación del relleno, de constatarse una variación brusca significativa de la concentración de estos parámetros deberá realizarse un análisis completo según lo señalado en el párrafo anterior y, de verificarse una contaminación de la napa por filtración de líquidos percolados, deberán iniciarse los estudios de terreno para determinar su causa y la forma de corregirla.

6.4 Monitoreo de gases posterior al cierre

Una vez efectuado el cierre del relleno sanitario, las chimeneas de extracción de biogás seguirán operativas, si bien el biogás emergerá a una tasa decreciente en el tiempo. Durante esta etapa será preciso mantener encendidas las chimeneas para evitar el riesgo de formación de bolsones de mezcla explosiva. Será importante medir la concentración de metano cada vez que una chimenea se apague con el fin de verificar la actividad metanogénica al interior del relleno. El monitoreo deberá extenderse por un lapso de al menos 10 años incluso si las chimeneas han sido selladas, caso en el cual se medirá la presencia de metano cada vez que se proceda a la apertura con el fin de evacuar el biogás residual según lo señalado en 5.3.

Capítulo 7

Cierre de botaderos a cielo abierto

7.1 Riesgos sanitarios y ambientales de los botaderos a cielo abierto

Los riesgos sanitarios y ambientales asociados a un botadero a cielo abierto son múltiples, entre los cuales cabe destacar los siguientes:

Atracción y proliferación de vectores sanitarios capaces de desempeñar un activo rol como transmisores de enfermedades de alta significación en salud pública. Especial mención a este respecto merecen la mosca, los roedores y los mosquitos.

La mosca doméstica es capaz de transportar mecánicamente un grupo importante de gérmenes patógenos, tales como los agentes causales de la fiebre tifoidea y paratifoidea, de las salmonelosis, de las disenterías y de otras enfermedades. La mosca transita fácilmente desde los sitios contaminados hasta los alimentos de las personas que habitan en las cercanías o directamente hasta la boca de los niños llevando consigo gérmenes patógenos, constituyéndose así en un importante agente de la transmisión de enfermedades entéricas.

Entre los mosquitos capaces de transmitir enfermedades a través de sus picaduras se encuentran los mosquitos del género Anopheles, responsables de la transmisión de la malaria, y los mosquitos del género Aedes, responsables de la transmisión del dengue y la fiebre amarilla. En relación a estos últimos, la acumulación de pequeñas cantidades de agua en latas, frascos de vidrio, botellas plásticas y neumáticos, de ocurrencia frecuente en los botaderos a cielo abierto, puede servir de criaderos en donde proliferen fácilmente si las condiciones de temperatura y humedad son favorables.

Los roedores, entre los cuales sobresalen las ratas de tipo doméstico, son responsables de los ciclos de transmisión de una gran cantidad de enfermedades entre las cuales cabe destacar el tifus murino, la leptospirosis, las diarreas y la triquinosis. Con frecuencia la existencia de botaderos a

Figura 7-1
Riesgos sanitarios asociados a los botaderos a cielo abierto

cielo abierto tiene asociada la permanencia de animales domésticos. De particular importancia sanitaria es la permanencia y alimentación de cerdos en los botaderos a cielo abierto debido a la alta tasa de cerdos parasitados cuando se alimentan en estas condiciones, siendo frecuentes la ocurrencia de brotes de triquinosis por consumo de sus carnes.

Entre los principales problemas ambientales asociados a los botaderos a cielo abierto, cabe mencionar la generación de malos olores y la emisión de humo, gases y material particulado por quema incontrolada de residuos. La quema incontrolada de residuos con abundante generación de humo es casi consustancial a la existencia de botaderos a cielo abierto y su extinción con frecuencia es difícil y costosa.

La contaminación de suelos debido al depósito indiscriminado de residuos en los botaderos a cielo abierto es habitual. La misma existencia del botadero a cielo abierto se presta para el depósito clandestino de residuos de diversa índole y naturaleza, muchos de ellos peligrosos y altamente contaminantes, los que fácilmente pueden llegar a contaminar masas y cursos de agua superficiales, por arrastre y escorrentías, y napas subterráneos debido a la infiltración de las aguas de precipitación que han entrado en contacto con materiales contaminantes.

Un punto adicional a destacar es la ocurrencia de accidentes entre las personas que concurren o permanecen en un botadero a cielo abierto. La presencia de vidrios quebrados, latas y otros materiales cortopunzantes son causa frecuente de accidentes y lesiones muchas de ellas invalidantes por infecciones subsecuentes y la falta de tratamiento adecuado.

Por último, cabe mencionar la contaminación acústica y visual comúnmente asociada a la existencia de un botadero a cielo abierto.

7.2 Necesidad de cierre y saneamiento de botaderos a cielo abierto

Un aspecto clave para el éxito de un relleno sanitario es el cierre de botaderos a cielo abierto existentes en su área de influencia, por lo que el catastro de los vertederos a cielo abierto y la programación de su clausura debe ser una labor paralela y coordinada con el diseño e implementación de un relleno sanitario y obedecer a un proceso debidamente planificado y no reducirse solo al abandono del botadero a cielo abierto preexistente, ya que se necesita, por una parte, un tiempo prudencial para la adaptación de los usuarios al nuevo sistema y, por otra parte, asegurarse que el botadero a cielo abierto deje de operar y no ofrezca condiciones para su uso ilícito.

El anuncio público y la comunicación directa de la apertura y puesta en operación de un nuevo relleno sanitario deben hacerse con la antelación suficiente para otorgar a los usuarios el tiempo necesario para adaptarse al cambio y asegurar así su cooperación.

La comunicación puede lograrse contactando

Figura 7-2
botadero a cielo abierto en Honduras

directamente a las instituciones, empresas y personas directamente involucradas, incluyendo autoridades políticas y administrativas, empresarios dedicados a la recolección, organizaciones civiles y sociales y residentes de las áreas cercanas.

El anuncio público puede hacerse a través de los medios de comunicación masiva locales tales como radio, prensa y televisión. También pueden ser útiles el envío de cartas al domicilio de las personas involucradas, publicaciones en boletines informativos y la realización de exposiciones en sedes municipales y comunitarias.

7.3 Planificación y ejecución del cierre de botaderos a cielo abierto

La sustitución de un botadero a cielo abierto por un relleno sanitario, si bien es una medida del todo necesaria y justificada desde el punto de vista sanitario y ambiental, requiere tener en consideración y resolver las implicaciones sociales, económicas e institucionales del cierre del botadero a cielo abierto.

Por lo general la existencia de un botadero a cielo abierto tiene aparejada la presencia de personas viviendo y trabajando en condiciones inaceptables desde el punto de vista sanitario, social y humano. La presencia de familias completas, incluyendo muchas veces niños, mujeres embarazadas y personas discapacitadas, que se han visto obligadas a vivir de la recuperación de materiales de entre las basuras debido a la falta de oportunidades más dignas de subsistencia y empleo requiere ser tenida en consideración al momento de cerrar un botadero a cielo abierto. Por una parte se deben tomar todas las medidas preventivas necesarias para evitar que esta población se desplace al nuevo relleno, ya que su presencia resultará incompatible con su operación, y por otra parte, las autoridades deben buscar la forma de ofrecer oportunidades más dignas de vivienda y trabajo, apoyados en programas de reinserción social, ya que no resultará fácil su integración a la comunidad.

Existen experiencias interesantes de incorporación de al menos parte de esta población a trabajos asociados al sistema de recolección de residuos sólidos urbanos y/o a actividades de mantención y limpieza de vías públicas.

El cierre de un botadero a cielo abierto implica desarrollar un plan de cierre previendo el uso que se dará finalmente al lugar. Requerirá como mínimo, la construcción de un cerco perimetral que impida el acceso de personas ajenas al predio, la instalación de la señalética correspondiente al cierre del botadero a cielo abierto y la designación de una o más personas responsables de la vigilancia de forma de asegurar que en el recinto no se depositarán más residuos.

Será importante extinguir los fuegos en caso de existir

y realizar un programa de control de vectores.

Antes de comenzar los trabajos de ordenamiento, compactación y cubrimiento de los residuos será necesario realizar una campaña de eliminación de roedores y moscas, ya que de lo contrario éstos, al perder su fuente de alimentación y refugio, tenderán a migrar hacia zonas aledañas poniendo en riesgo la salud de los habitantes de las zonas invadidas.

El cubrimiento de los residuos una vez ordenados y compactados deberá hacerse con una capa de tierra de al menos 60 cm de espesor y prever una capa final de vegetación con el fin de evitar la erosión por escurrimientos superficiales.

Debe preverse la inspección periódica del sitio con el fin de verificar que el sitio no sea utilizado para el vertimiento clandestino de residuos y comprobar su comportamiento y estabilidad.

Anexos

Anexo 1 Residuos sólidos. Datos cuantitativos y cualitativos

Tabla 1.1 Generación per-cápita promedio de residuos sólidos en las principales cabeceras municipales de Honduras. 2003. [18]

Rango de Población	Cabecera Municipal	Generación per cápita Promedio de residuos domiciliarios Kg/hab/día	Generación per cápita Promedio de residuos municipales Kg/hab/día
500,001 a 1,000,000	Distrito Central	0.54	0.67
200,001 a 500,000	San Pedro Sula	0.55	0.69
100,001 a 200,000	La Ceiba	0.53	0.63
50,001 a 100,000	Choloma	0.52	0.70
	Comayagua	0.45	0.49
	El Progreso	0.52	0.60
	Choluteca	0.45	0.47
	Puerto Cortes	0.44	0.48
15,001 a 50,000	La Lima	0.40	ND
	Catacamas	0.52	ND
	Juticalpa	0.38	ND
	Villanueva	0.51	ND
	Tocoa	0.32	ND
	Olanchito	0.45	ND
	San Lorenzo	0.40	ND
	Nueva Arcadia	0.28	ND
	Yoro	0.39	ND
Menos de 15,000	Nacaome	0.30	ND
	Potrerillos	0.28	ND
	Santa Barbará	0.35	ND
	Talanga	0.32	ND
	Intibuca	0.20	ND
	Guaimaca	0.25	ND
	Sonaguera	0.28	ND

18 Fuente: Análisis Sectorial de Residuos Sólidos. Honduras 2010. Publicado por OPS.

Tabla 1.2 Generación per cápita de residuos sólidos domiciliario y residuos sólidos municipales en áreas metropolitanas y ciudades de América Latina y el Caribe. [19]

Generación per cápita de RSD y RSU en ALC (kg/hab/día).

	Micro		Pequeño		Mediano		Grande		Mega		País	
PAIS	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU
Argentina	0,66	0,92	0,68	1,06	0,8	1,02	0,78	1,41	..	..	0,77	1,15
Belice	-	-	-	-	-	-	-	-	..	..	-	-
Bolivia	0,27	0,29	0,4	0,43	0,45	0,48	0,51	0,55	..	..	0,46	0,49
Brasil	0,49	0,87	0,54	0,86	0,66	0,85	0,78	1,31	0,91	1	0,67	1
Chile	0,75	1,28	0,76	1,43	0,8	1,21	0,86	1,12	..	..	0,79	1,25
Colombia	0,41	0,48	0,4	0,55	0,56	0,57	0,59	0,66	0,73	0,82	0,54	0,62
Costa Rica	-	1,21	-	0,75	-	0,89	-	1,2	..	..	-	0,88
Ecuador	0,41	0,54	0,45	0,66	0,59	0,68	0,73	0,85	..	..	0,62	0,71
El Salvador	0,3	0,48	0,42	0,64	0,58	0,94	0,58	1,74	..	..	0,5	0,89
Guatemala	0,36	-	0,42	0,5	0,52	0,62	0,5	0,62	..	..	0,48	0,61
Guyana	-	-	-	-	-	-	-	-	..	..	-	-
Honduras	0,27	-	0,37	-	0,67	-	0,94	-	..	..	0,61	-
Jamaica	0,6	-	0,64	-	0,83	-	0,95	-	..	..	0,71	-
México	0,32	0,53	0,47	0,78	0,49	0,83	0,75	1,1	0,65	1,34	0,58	0,94
Nicaragua	-	-	0,7	-	0,57	-	1	-	..	..	0,73	-
Panamá	0,46	0,54	0,57	1,11	0,59	0,96	0,5	1,6	..	..	0,55	1,22
Paraguay	0,63	0,72	0,63	0,86	0,72	1,02	0,83	1,28	..	..	0,69	0,94
Perú	0,33	0,53	0,41	0,63	0,51	0,67	0,48	0,85	0,43	0,81	0,47	0,75
Rep. Dom.	-	-	0,9	1	0,75	1,01	0,9	1,2	..	..	0,85	1,1
Uruguay	0,72	0,85	0,67	1,07	0,46	0,81	0,88	1,22	..	..	0,75	1,03
Venezuela	-	0,5	0,77	0,78	0,51	0,75	0,82	1,08	..	..	0,65	0,86

Micro: ≤15.000 habitantes; Pequeño: 15.001 - 50.000 habitantes; Mediano: 50.001 - 300.000 habitantes; Grande: 300.001 - 5.000.000 habitantes; Mega > 5.000.000 habitantes - Información no disponible - Sin población de ese tamaño

19 Fuente: Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe. 2010. OPS/OMS-AIDIS-BID.

Tabla 1.3 Generación per cápita de residuos sólidos municipales en países OCDE.[20]

País	ppc (kg/hab/día)
Noruega	2,27
Dinamarca	2,19
Irlanda	2,14
Estados Unidos	2,08
Suiza	1,95
Luxemburgo	1,89
Países bajos	1,73
Austria	1,62
Alemania	1,59
España	1,59
Reino Unido	1,56
Islandia	1,53
Italia	1,51
Francia	1,48
Suecia	1,42
Finlandia	1,40
Bélgica	1,34
Portugal	1,29
Hungría	1,26
Grecia	1,23
Turquía	1,18
Japón	1,12
Canadá	1,10
Corea	1,04
Polonia	0,88
República Checa	0,79
República Eslovaca	0,79
U. Europea total	1,42
OCDE total *	1,53

20 Fuente: OECD (2010), “Municipal Waste”, in OECD Factbook 2010: Economic, Environmental and Social Statistics, OECD Publishing. http://dx.doi.org/10.1787/factbook-2010-64-en

Tabla 1.4 Evolución de la composición de los residuos domiciliarios de la provincia de Santiago, Chile. (Porcentaje en peso)

COMPONENTES	1973 (1)	1977 (2)	1979 (3)	1983 (4)	1990 (5)	1991 (6)	1992 (7)	2005 (8)
Materia orgánica	73.0	68.29	63.86	62.2	68.14	55.05	49.3	45.79
Papel y Cartón	16.0	19.26	16.42	18.9	14.85	16.77	18.8	17.12
Escombros,Cenizas y Lozas	0.6	1.58	7.26	6.5	-	3.75	5.9	3.82
Plástico	2.2	2.38	2.72	4.4	5.82	8.15	10.3	9.72
Textiles y Cueros	2.0	3,73	4.47	3.6	3.85*	7.50	4.3*	1.79
Metales	2.8	2.95	2.24	2.5	2.17	2.22	2.3	3.72
Vidrios	0.9	0.86	1.10	1.3	1.44	1.73	1.6	4.12
Huesos	2.0	0.29	0.80	0.3	-	1.43	0.5	0.54
Otros	0.5	0.66	1.11	0.3	3.73	3.42	7.0	13.38
Densidad	0.3	0.164		0.192		0.202	0.220	
Humedad	66.4			64.7		53.9	50.3	

Fuentes:
(1) José Bianchi Cerda. Universidad de Chile, 1973
(2) Concha y Szczaranski, Universidad de Chile, 1977
(3) Isamitt y Kauak. Universidad de Chile, 1979
(4) Garcés. Universidad de Chile, 1983
(5) Sandra Pinto. Universidad de Santiago, 1990
(6) INTEC, 1991
(7) María Luisa Rivas. Universidad de Chile, 1994.
(8) Grupo de Residuos Sólidos P.U.C.V. 2005

* Incluye sólo textiles

Tabla 1.5 Composición de residuos sólidos urbanos en ciudades del mundo seleccionadas.[21]

CIUDAD	Papel (%)	Vidrio (%)	Metales (%)	Plásticos (%)	M. Orgánica (%)	Otros (%)
Adelaida, Australia	7	5	5	5	26	52
Rotterdam, Países bajos	27	8	3	17	26	19
Tompkins County, USA	36	6	8	11	29	11
San Francisco, USA	24	3	4	11	34	24
Lusaka, Zambia	3	2	1	7	39	48
Curepipe, Rep. de Mauricius	23	2	4	16	48	7
Ciudad de Quezon Filipinas	13	4	4	16	50	12
Kunming, China	4	2	1	7	58	26
Nairobi, Kenia	6	2	1	12	65	15
Cañete, Perú	6	2	2	9	70	11
Bangalore, India	8	2	0	7	72	10
Daka, Bangladesh	9	0	0	4	74	13
Ghorahi, Nepal	6	2	0	5	79	7
Deli, India	7	1	0	10	81	0

21 Fuente: Adaptado de Solid Waste Management in the World's Cities. UN HABITAT; 2010.

Anexo 2 Poder Calorífico

El poder calorífico de los residuos corresponde a la energía calórica que éstos son capaces de liberar al someterlos a un proceso de combustión completa. El conocimiento del poder calorífico de los residuos recolectados en una ciudad es fundamental para evaluar la factibilidad de utilizar la incineración como método de tratamiento.

Para los efectos de medir el poder calorífico de los residuos, se preparan cápsulas con material obtenido de muestras representativas de los residuos, las que se someten a un proceso normalizado de combustión en un equipo de laboratorio denominado calorímetro. A partir de los resultados obtenidos en laboratorio es posible calcular el poder calorífico de los residuos tal como son recoletados.

El poder calorífico se expresa en términos de Kilocalorías por kilogramo de residuos (Kcal/kg).

Para los efectos de evaluar las posibilidades de aprovechamiento energético y/o la factibilidad de incineración es necesario diferenciar entre el poder calorífico superior, Ps, y el poder calorífico inferior, Pi.

El poder calorífico superior corresponde al total de energía calórica que es capaz de liberar un kg de residuos al ser sometido a un proceso de combustión completa.

El poder calorífico inferior corresponde al poder calorífico superior menos la cantidad de energía calórica que se consume en evaporar el agua contenida en el kg de residuos. El poder calorífico inferior corresponde a la cantidad de energía calórica efectivamente aprovechable, ya que en un proceso de combustión, para alcanzar la combustión completa será necesario previamente conseguir la evaporación de la totalidad de agua contenida en los residuos (contenido de humedad).

Dado que para evaporar un kg de agua se requieren alrededor de 600 Kcal, la relación entre el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior está dada por la ecuación siguiente:

$$Pi = Ps - \frac{W}{100} \times 600 \ \frac{kcal}{kg}$$

W = porcentaje de humedad de los residuos

De acuerdo a la literatura técnica disponible, para incinerar los residuos sin necesidad de agregar combustible auxiliar se requiere que estos tenga un Pi de al menos 1.000 a 1.500 Kcal/kg.

Método para estimar el poder calorífico de los residuos sólidos.

Es posible hacer una estimación aproximada del poder calorífico superior de los residuos si se conoce su composición y se asume el poder calorífico de cada componente seco. Un supuesto en esta estimación es que el total de humedad está contenido en la materia orgánica biodegradable.

Poder calorífico de componentes secos

Componente seco	Poder calorífico Kcal/kg
a. Papel y cartón	4.000 Kcal/kg
b. Textiles y trapos	4.000 Kcal/kg
c. Madera y follaje	4.000 Kcal/kg
d. Restos de alimentos	4.000 Kcal/kg
e. Plásticos, caucho y cueros	9.000 Kcal/kg
f. Metales	0 Kcal/kg
g. Vidrios	0 Kcal/kg
h. Suelo y otros inertes	0 Kcal/kg

Estimación poder calorífico superior

Componente	Composición húmeda (%)	Composición seca (%)	Poder calorífico superior (Kcal/kg)
Papel y cartón	A	A+B+C+D-W	$\frac{(A+B+C+D-W)}{100} * 4.000$
Textiles y trapos	B		
Madera y follaje	C		
Restos de alimentos	D		
Plásticos, caucho y Cueros	E	E	$\frac{E}{100} * 9.000$
Total			$(A+B+C+D-W) * 40 + E * 90$

Notas:

i) W = contenido de humedad de los residuos expresado en porcentaje (%)

ii) Los Metales, Vidrios, Suelos y otros inertes son incombustibles y no aportan energía calórica

iii) Toda la humedad W se supone contenida en los componentes a, b, c, y d.

iv) Adaptado de “Nota Técnica. Método Sencillo de Análisis de la Basura” K. Sakurai. CEPIS, OPS/OMS.

Anexo 3 Centro de gravedad de generación de los residuos

Se define el Centro de gravedad de generación de los residuos, CGR, como el punto teórico desde donde podrían trasladarse al relleno sanitario todos los residuos generados en una ciudad, o en parte de una ciudad, a igual costo que si fueran trasladados desde los diversos puntos donde son efectivamente generados.

La determinación del Centro de gravedad de generación de los residuos resulta de enorme utilidad para comparar, por ejemplo, las distancias a que se encuentran diferentes sitios seleccionados preliminarmente para localizar un relleno sanitario o para analizar la conveniencia de instalar una o más estaciones de transferencia en una ciudad.

Para determinar el Centro de gravedad de generación de los residuos en una ciudad determinada se requiere conocer la cantidad de residuos generada en cada área de la ciudad. Para un cálculo minucioso del CGR se podría tomar como base la cantidad promedio recolectada en cada circuito de recolección, si bien para fines prácticos resulta suficiente tomar como base divisiones administrativas mayores, tales como los municipios en que está dividida la ciudad o algún otro tipo de división administrativa asociada a las ppc de los diversos sectores que conforman la ciudad.

A modo de ejemplo, a continuación se calculan las coordenadas del CGR de una ciudad en la cual se conoce la ppc y la población de cada uno de los diferentes sectores de generación en que se ha divido la cuidad, suponiendo que, dadas las características y tamaño, es posible estimar un punto donde asignar la generación de cada sector:

El sector 1 corresponde a la zona centro-comercial de construcción en altura media e importante población flotante (personas que trabajan en el sector pero que habitan en sectores residenciales aledaños y presencia de turistas).

Tiene una ppc de 1,3 kg/hab/día y según censo una población de 80.000 habitantes.

El sector 2 corresponde a una zona residencial-comercial de construcción en altura moderna en que reside una población de nivel socioeconómico alto.

Tiene una ppc de 1,1 kg/hab/día y según censo una población 30.000 habitantes.

El sector 3 corresponde a una zona residencial de densidad de población baja en que reside una población de alto nivel socioeconómico.

Tiene una ppc de 1,0 kg/hab/día y según censo una población 15.000 habitantes.

El sector 4 corresponde a una zona residencial de densidad de población media en que reside una población de nivel socioeconómico medio.

Tiene una ppc de 0,8 kg/hab/día y según censo una población 60.000 habitantes.

El sector 5 corresponde a una zona residencial de densidad de población media-baja en que reside una población de nivel socioeconómico bajo.

Tiene una ppc de 0,7 kg/hab/día y según censo una población 100.000 habitantes.

El sector 6 corresponde a una zona residencial de densidad de población baja en que reside una población de nivel socioeconómico bajo.

Tiene una ppc de 0,6 kg/hab/día y según censo una población 70.000 habitantes.

Si se trazan 2 ejes arbitrarios de referencia sobre el plano de la ciudad, es posible medir las coordenadas del punto de generación asignado a cada sector y dado que, a partir de la ppc y la población de cada sector, se puede conocer la cantidad diaria pi de residuos que produce cada sector, es posible construir la siguiente tabla resumen:

Sector 1
x1 = 6,0 Km y1 = 4,1 Km p1 = 104 ton/día

Sector 2
x2 = 6,4 Km y2 = 5,4 Km p2 = 33 ton/día

Sector 3
x3 = 8,4 Km y3 = 4,2 Km p3 = 15 ton/día

Sector 4
x4 = 4,1 Km y4 = 3,8 Km p4 = 48 ton/día

Sector 5
x5 = 7,5 Km y5 = 2,6 Km p5 = 70 ton/día

Sector 6
x6 = 3,6 Km y6 = 2,4 Km p6 = 42 ton/día

Las coordenadas del CGR, en los mismos ejes anteriores están determinadas por las siguientes ecuaciones:

$$Xc = \frac{\sum xi \bullet pi}{\sum pi}$$

$$Yc = \frac{\sum yi \bullet pi}{\sum pi}$$

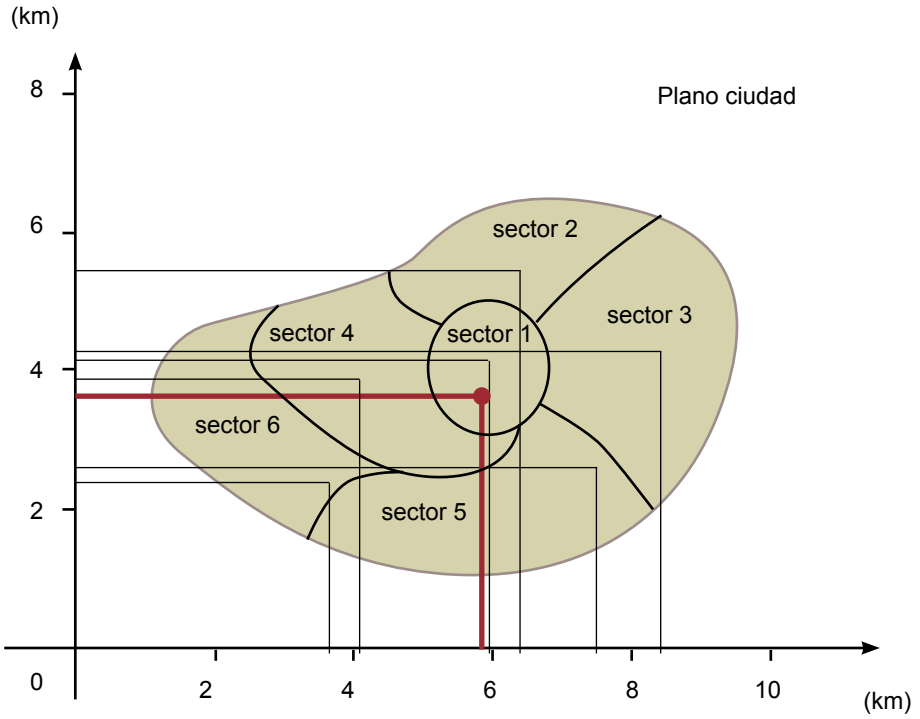
Aplicando las ecuaciones anteriores al ejemplo propuesto, se tiene:

$$\mathbf{Xc} = \frac{6{,}0 * 104 + 6{,}4 * 33 + 8{,}4 * 15 + 4{,}1 * 48 + 7{,}5 * 70 + 3{,}6 * 42 \text{ (Km} * \text{ton)}}{104 + 33 + 15 + 48 + 70 + 42 \text{ (ton)}}$$

$$\mathbf{Xc} = 5{,}9 \text{ km}$$

$$\mathbf{Yc} = \frac{4{,}1 * 104 + 5{,}4 * 33 + 4{,}2 * 15 + 3{,}8 * 48 + 2{,}6 * 70 + 2{,}4 * 42 \text{ (Km} * \text{ton)}}{104 + 33 + 15 + 48 + 70 + 42 \text{ (ton)}}$$

$$\mathbf{Yc} = 3{,}6 \text{ km}$$


(km)
Plano ciudad
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
(km)
sector 1
sector 2
sector 3
sector 4
sector 5
sector 6

Anexo 4 Consideraciones económicas

Alternativas de manejo

Desde el punto de vista de los costos del tratamiento y/o disposición final, y suponiendo que cualquiera sea el procedimiento adoptado éste cumpla con los mínimos requerimientos sanitarios y ambientales, el relleno sanitario aparece en los países en desarrollo, salvo casos muy particulares, como la primera opción técnica y económica para dar adecuado tratamiento y disposición final a los residuos sólidos domésticos.

El alto contenidos de humedad que caracteriza a los residuos sólidos domésticos de la mayoría de los países de América Central y del Sur, y como consecuencia de ello el bajo poder calorífico inferior de dichos residuos, limita fuertemente las posibilidades de utilizar la incineración o la pirolisis como alternativas económicamente viables para tratar los residuos sólidos domésticos en estos países.

Por otra parte, el alto de contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos domésticos en estos mismos países, determina la factibilidad técnica del compostaje y de la transformación de parte de los residuos en compost. Sin perjuicio de lo anterior, el compost es un producto útil como mejorador de suelos pero de pobre contenido de los nutrientes requeridos por los cultivos y resulta caro de transportar, lo que limita en la práctica su demanda por parte de los agricultores, haciendo inviable económicamente la fabricación de compost, salvo en pequeña escala y utilizando residuos previamente seleccionados, como es el caso de los residuos de mercados o los provenientes de algunas agroindustrias.

Por último, el reciclaje constituye una práctica del todo recomendable desde el punto de vista de la protección de los recursos naturales y de la formación de hábitos en la población, si bien la experiencia señala que, dado el bajo contenido de materiales reciclables de los residuos sólidos domésticos de los países en desarrollo, el reciclaje no resulta una actividad económicamente rentable y usualmente requiere de incentivos o subsidios para hacerla sostenible, en particular cuando se trata de reciclaje en origen. El reciclaje en destino de los residuos sólidos domésticos no es una práctica recomendable en los países de la región y usualmente solo se viabiliza en la medida en que para su desarrollo se prescinde de los mínimos requerimientos sanitarios y ambientales.

Estructura de costos de los servicios de aseo urbano

Los servicios de aseo urbano comprenden, en términos generales, las siguientes actividades: limpieza de vías y espacios públicos, recolección y transporte, transferencia, tratamiento y disposición final de residuos sólidos. Si se consideran solo las actividades de recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición, -excluyendo lo referente a limpieza de vías y espacios públicos-, y tratándose de la utilización de rellenos sanitarios que cumplan con los requerimientos técnicos, sanitarios y ambientales como sistema de tratamiento y disposición final, los

principales costos de un sistema aseo urbano recaen sobre las actividades de recolección, transporte y transferencia (cuando esta última está presente), siendo atribuible al relleno sanitario solo entre un 10 y un 20 por ciento del costo total.

Distribución aproximada de costos del manejo de los residuos sólidos en algunos países latinoamericanos

Actividad	% Respecto al total
Recolección	53 – 84%
Transferencia	12 – 18%
Disposición Final	16 – 47%
Total (sin barrido)	100%

Fuente: Adaptado del Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y El Caribe. OPS/OMS, AIDIS, BID. 2010.

Costo de un relleno sanitario

El costo unitario total de un relleno sanitario, incluyendo costos de inversión y operación, varía fuertemente según sea el tipo de relleno, el método elegido para operar y el tamaño del relleno. Un componente importante de los costos de operación dice relación con el costo de la maquinaria y demás equipo mecánico, de allí la importancia de dimensionar técnicamente las necesidades de maquinaria. Un equipo mecánico sobredimensionado implica una inversión desaprovechada donde la maquinaria funciona unas pocas horas al día, determinando en no pocas ocasiones su traslado hacia otras faenas en detrimento de la operación del relleno sanitario.

Costos aproximados del manejo de los residuos sólidos en algunos países latinoamericanos

Actividad	Valor aproximado en US $
Recolección	7– 55 por tonelada
Transferencia	5 – 15 por tonelada
Disposición Final (Relleno)	6 – 35 por tonelada
Total (sin barrido)	11 – 90 por tonelada

Fuente: Adaptado del Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y El Caribe. OPS/OMS, AIDIS, BID. 2010.

En las cifras entregadas en la tabla anterior se aprecia que existe un amplio del rango de variación para los costos unitarios de la disposición final. Esto debido a que existe un grupo de países que reporta valores cercanos o inferiores a 10 US$/ton (Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay, Honduras, Bolivia, México y Chile), en tanto que otro grupo de países reporta cifras cercanas a 20 US$/ton (Argentina, Colombia, Costa Rica y El Salvador), por último Brasil informa un valor superior a los 30 US$/ton para la disposición final.

En el caso de rellenos sanitarios que sirven a pequeñas poblaciones los costos unitarios pueden reducirse significativamente si se hace un buen proyecto y una buena programación de actividades. En estos casos es preferible optar por diseños y modalidades de operación acordes con la cantidad diaria de residuos a manejar, tales como el relleno sanitario semi-mecanizado o el relleno sanitario manual, en donde la maquinaria pesada de alta potencia se lleva al sitio del relleno en forma programada y por períodos cortos.

Los costos de un relleno sanitario de operación manual racionalmente diseñado y operado pueden ser del orden de 3 a 5 US $ por tonelada.

Modalidades de ejecución

Un relleno sanitario puede ser ejecutado directamente por el municipio o a través de terceros mediante licitación. También hay experiencias interesantes en el continente con la formación de empresas municipales o estatales responsables del tratamiento y/o la disposición final.

Las tres modalidades mencionadas anteriormente tienen ventajas y desventajas y no hay razones que permitan afirmar, en términos absolutos, que una modalidad es mejor que otra. La experiencia demuestra que cualquiera de ellas puede dar óptimos resultados cuando se conjuga la capacidad técnica con la buena gestión y la probidad.

Sin perjuicio de lo anterior, es posible indicar algunos de los principales riesgos asociados a las diferentes modalidades mencionadas.

- Los municipios no siempre disponen, o pueden adquirir, los cuadros técnicos necesarios para ejecutar el servicio directamente.

- La ejecución directa por parte de los municipios y empresas municipales puede conducir en ciertos casos a la adopción de decisiones políticas respecto cuestiones técnicas, económicas y/o de gestión.

- En la ejecución privada existe el riesgo que el esfuerzo por maximizar utilidades lleve a descuidar aspectos sanitarios y ambientales durante la operación.

- La licitación del servicio deja al municipio sin parámetros de comparación respecto de la evolución real de los costos de operación lo que puede conducir a la elevación injustificada de precios en licitaciones posteriores.

- La corrección de fallas en la operación de un relleno licitado no resulta fácil cuando frente a la eventual sanción existe el riesgo de suspensión del servicio.

Anexo 5 Contenido de un proyecto de relleno sanitario

Un proyecto de relleno sanitario debe contener toda la información necesaria que permita respaldar técnicamente su diseño, replantear en terreno las obras concebidas y ejecutar cada una de las etapas de su ciclo de vida, esto es su implementación, operación, cierre y posterior seguimiento.

Para los efectos de lo anterior, usualmente se reconocen como componentes del proyecto la Memoria descriptiva, el Diseño y especificaciones técnicas y los Planos. Eventualmente, y dependiendo de la envergadura de la obra proyectada, de las características del entorno elegido para su emplazamiento y de la reglamentación aplicable, se requerirán además Estudios específicos adicionales.

Cabe señalar que dada la amplia gama de tamaños que puede tener un relleno sanitario, según la población a la que dé servicio, las exigencias respecto de la extensión, profundidad y detalle de cada uno de los componentes anteriormente mencionados de un proyecto deberá ser coherente y proporcional a la complejidad de cada proyecto en particular.

Memoria descriptiva

La Memoria descriptiva corresponde al resumen general del proyecto y debe abordar, según el caso, los siguientes aspectos:

- Justificación del proyecto y criterios generales de diseño adoptados
- Criterios de selección y descripción de lugar seleccionado
- Generación y caracterización de los residuos a recibir y su proyección
- Descripción de los elementos básicos del proyecto: áreas a rellenar, diseño de la celda tipo, vida útil del relleno, impermeabilización de fondo y lateral, zanjas de interceptación de aguas de escorrentía, sistemas de drenaje, manejo de lixiviados y manejo biogás, obras anexas, etc.
- Plan de operación. Procedimiento de construcción de las celdas sanitarias, obtención del material de cobertura, Programa de avance, incluyendo rellenamiento, impermeabilización, habilitación de caminos internos, etc., monitoreo ambiental, pesaje y registro de ingreso de residuos, Plan de contingencias.
- Plan de cierre y seguimiento posterior

Diseño y especificaciones técnicas

Corresponde a la información técnica relativa a los parámetros y criterios de cálculo utilizados para el diseño de las obras específicas así como la información técnica necesaria para su correcta materialización, incluyendo tipo y calidad de los materiales a emplear, maquinaria requerida para operar, etc., incluyendo, entre otras:

- Vías de circulación internas
- Impermeabilización de fondo y lateral del relleno
- Zanjas de interceptación de aguas de escorrentías externas
- Drenaje de aguas de precipitación
- Cobertura de las celdas
- Pendientes y taludes
- Obras e instalaciones de manejo y control de gases y lixiviados
- Instalaciones e instrumentos de monitoreo
- Obras anexas: cierre perimetral, balanza, oficinas administrativas, caseta de vigilancia, etc.
- Provisión de agua potable y saneamiento, instalaciones de higiene
- Obras de cierre y de monitoreo post-cierre

Planos

Se debe contar con planos suficientes para tener una clara visión de la obra proyectada especificando la ubicación de cada componente de importancia. El detalle y la escala de los planos serán función de la envergadura y complejidad de la obra. En términos generales, si bien dependerá de cada caso específico, los planos deben incluir:

- Plano de ubicación general (escala 1:5.000 ó 1:10.000)
- Topografía del sitio del relleno con curvas de nivel cada metro (escala 1:500, 1:1.000 ó 1:2.000)
- Perfiles longitudinales y transversales (escala 1:200, 1:500 ó 1:1.000)
- Vías de acceso y circulación (escala 1:200, 1:500, 1:1.000 ó 1:2.000)
- Obras anexas e infraestructura (escala 1:100, 1:500, 1:1.000 ó 1:2.000)
- Distribución de las celdas y sobreceldas (escala 1:500, 1:1.000 ó 1:2.000)
- Cortes transversales y longitudinales de las celdas y sobreceldas (escala 1:200, 1:500 ó 1:1.000)
- Drenaje de aguas superficiales (escala 1:500, 1:1.000 ó 1:2.000)
- Sistema de drenaje de gases y lixiviados (escala 1:500 ó 1:1.000)

- Laguna de lixiviados (escala 1:500, 1:1.000 ó 1:2.000)
- Esquemas de obras menores a escalas apropiadas

Estudios específicos adicionales

Adicionalmente puede ser necesario incorporar en el proyecto, cuando la complejidad, magnitud o reglamentación lo exija algunos estudios especiales, tales como:

- Estudios geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y geotécnicos
- Estudios meteorológicos
- Estudios de impacto ambiental
- Otros